

**EFEITO DO ENTORNO URBANO SOBRE AS AÇÕES DO
VENTO EM EDIFÍCIOS**

Mario Eduardo De Bortoli

Porto Alegre
Dezembro de 2005

MARIO EDUARDO DE BORTOLI

**EFEITO DO ENTORNO URBANO SOBRE AS AÇÕES DO
VENTO EM EDIFÍCIOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em
Engenharia na modalidade Acadêmico

Porto Alegre
Dezembro de 2005

B739e Bortoli, Mario Eduardo De
Efeito do entorno urbano sobre as ações do vento em
edifícios /
Mario Eduardo de Bortoli. – 2005.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio
Grande do Sul.
Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia
Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2005.

Orientador : Prof. Dr. Jorge Daniel Riera
Co-orientador : Prof. Dr. Mario José Paluch

MARIO EDUARDO DE BORTOLI

**EFEITO DO ENTORNO URBANO SOBRE AS AÇÕES DO
VENTO EM EDIFÍCIOS**

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 21 de Dezembro de 2005.

Prof. Jorge Daniel Riera
Ph.D., pela University of Princeton , EUA
Orientador

Prof. Mario José Paluch
D.Sc. pela UFRGS, Brasil
Co-orientador

Prof. Américo Campos Filho
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Acir Mércio Loredou-Souza (UFRGS)
Ph.D. pela University of Western Ontário, Canadá

Prof. Carlos Eduardo Nigro Mazzilli (EPUSP/SP)
Ph.D. pela University of London, Inglaterra

Prof. Sérgio Viçosa Möller (PROMEC/UFRGS)
Dr. Universität Karlsruhe, Alemanha

Dedico este trabalho aos meus filhos, Mario e Guillermo.
Para Patrícia.
Meus amigos, Jorge e Adrián.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador e co-orientador Prof. Jorge Daniel Riera e Prof. Mario José Paluch pela dedicação e estímulo prestados durante a realização deste trabalho.

Aos laboratoristas José e Julián do Laboratório de Aerodinâmica da Facultad de Ingeniería (UNNE, Argentina) pela atenção dispensada.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

À empresa Geoshark que facilitou as plantas para as reproduções dos modelos urbanos.

À Organização dos Estados Americanos (O.E.A.) pela bolsa de estudo concedida.

RESUMO

DE BORTOLI, M. E. – **Efeito do entorno urbano sobre as ações do vento em edifícios.** Dissertação de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

Neste trabalho de pesquisa desenvolveu-se uma metodologia, através de ensaios em túnel de vento, para determinar as cargas sobre estruturas altas situadas em centros urbanos e considerando a distribuição aleatória do entorno superficial.

Assim, como este estudo trata do problema da determinação de cargas de estruturas situadas em centros urbanos, produziu-se, em primeiro lugar, o campo de velocidades de fundo, caracterizado por um terreno suburbano e definido pelo Código Brasileiro NBR/6123, Terreno Categoria IV.

Posteriormente, nas cercanias do modelo em estudo, adicionou-se o entorno superficial. Para contemplar as variações das cargas provocadas pelo vento no entorno rugoso, as estruturas que o conformam dimensionaram-se através da Técnica Monte Carlo. Apresenta-se um método para reproduzir o entorno superficial em zonas centrais de grandes cidades, considerando a natureza aleatória das dimensões e a separação das construções, permitindo simular campos ou processos aleatórios, neste caso o entorno, definido como um campo aleatório tridimensional, em termos da densidade de probabilidade e da densidade espectral das construções.

Analizou-se a estrutura da camada limite urbana na região inferior, por meio das medições em diferentes alturas das velocidades médias e flutuantes, intensidade de turbulência, macroescala integral e escala temporal da turbulência e espectros da componente de velocidade flutuante longitudinal. A bibliografia indica que para verificar a presença da subcamada rugosa, em camada limite sobre superfície rugosa, é suficiente comprovar que as tensões de Reynolds aumentam com a altura de medição. Neste trabalho, sem haver realizado medições de Tensões de Reynolds, foi possível reconhecer a presença da subcamada rugosa através de medições e comparações em diferentes alturas de velocidades médias e valores estatísticos da componente flutuante longitudinal do escoamento médio. Verificou-se que o campo de velocidade em centro urbano é nitidamente tridimensional e que a direção do vento de fundo influi no campo de velocidade. Ademais, sugeriu-se um espectro de potência para

análise dinâmica de edifícios altos expostos à ação do vento em ambientes urbanos, assim como recomendações referidas à variação de velocidade e intensidade de turbulência da componente longitudinal da turbulência.

Para analisar a confiabilidade das cargas de vento sugeridas nos códigos de vento Argentino e Brasileiro estudaram-se as cargas sobre dois modelos de diferentes alturas, medidas em condição de modelo isolado e situado em seis situações de entornos rugosos diferentes.

As cargas medidas foram momentos de flexão na base longitudinal e transversal ao escoamento médio e momento de torção. Com os resultados obtidos, pode-se avaliar as diferenças com respeito às cargas sugeridas pelos códigos NBR 6123 e CIRSOC 102 e as variações provocadas ao modificar as rugosidades superficiais.

Palavras-chave: modelagem urbana; modelagem aeroelástica; ação do vento; efeito da rugosidade; processo aleatório.

ABSTRACT

DE BORTOLI, M. E. –**Influence of the urban environment on wind loads on buildings.** Dissertação de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

In this research work a methodology to determine loads on tall structures located in urban centres is proposed. The proposal is based in wind tunnel tests and considers a random distribution of the surface environment.

As this study deals with the determination of wind loads on structures located in urban centres, firstly the background wind velocity field, characterized by a suburban terrain, which is defined by the Brazilian code of practice NBR/6123 as a terrain of Category IV, had to be reproduced.

Thereafter, the near environment of the model under study was added. In order to take into account the variations of loads caused by the random environment, the structures that shape it were dimensioned using the Monte Carlo technique. A procedure to reproduce the surface neighbouring in central areas of large cities considering the random nature of both size and distribution of buildings is presented. This procedure allows simulating either random fields or processes, in this case the neighbouring, which is defined as a three-dimensional random field, in terms of both its probability density and its spectral density.

The structure of the lower part of the urban boundary layer was studied by means of measurements at different heights of both fluctuating and mean velocities, turbulence intensity, integral macroscale and time scale of turbulence, and spectra of the longitudinal fluctuating velocity component. It is widely accepted in the literature that verifying that the Reynold stresses increases with height is sufficient to prove the existence of the rough sub-layer in a boundary layer over rough surface. As in this work Reynolds stresses were not measured, it was possible to distinguish the presence of a roughness surface through measurements and comparisons of mean velocities and statistical values of the longitudinal fluctuating component of the mean flow at different heights. It was verified that the velocity field in an urban centre is clearly three-dimensional and that the direction of the background wind has influence on the velocity field. Furthermore, a power spectrum for the dynamic analysis of tall buildings exposed to wind in urban environments is suggested as well as

guidelines regarding the variation of both the velocity and turbulence intensity of the longitudinal component of the turbulence.

Loads over two models were studied in order to analyse the reliability of the loads suggested by codes of Argentina e Brasileiro. The models had different heights and loads were measured with the models isolated and in six situations of different rough urban environments.

The loads that were measured were longitudinal-to-the-mean-flow and transversal-to-the-mean-flow bending and torsion moments. With these results it was possible to assess the differences with regard to loads suggested by the code NBR 6123 and CIRSOC 102 and the variations appearing when changing the surface roughness.

Key words: urban modelling; aerolastic modelling; wind action; rugosidad efect; random process.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.	15
LISTA DE TABELAS.	24
LISTA DE SÍMBOLOS.	26
1. INTRODUÇÃO.	31
2. ANÁLISE DO VENTO ATMOSFÉRICO EM ÁREAS URBANAS NA ENGENHARIA ESTRUTURAL.	34
2.1 DESCRIÇÃO DO VENTO ATMOSFÉRICO.	34
2.2 VENTOS FORTES.	35
2.3 ALEATORIEDADE DO VENTO NATURAL.	36
2.3.1 Variação da Velocidade Média com a Altura.	36
2.3.2 Análise Estatística das Velocidades Instantâneas.	37
2.4 CAMADA LIMITE EM AMBIENTE URBANO.	43
2.4.1 Revisão de trabalhos que descrevem a modificação no escoamento nas vizinhanças de obstáculos superficiais.	47
3. MODELAGEM FÍSICO DE AMBIENTE URBANO.	57
3.1 MODELAGEM FÍSICO EM TÚNEL DE VENTO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL.	57
3.2 IMPORTÂNCIA DA REPRODUÇÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL EM ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO.	59
3.3 ESTUDO ESTATÍSTICO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DO CENTRO DA CIDADE DE BUENOS AIRES.	60
3.4 MÉTODO DE SIMULAÇÃO MONTE CARLO.	62
3.5 REPRODUÇÃO DO ENTORNO POR MEIO DO MÉTODO	

MONTE CARLO.	65
3.6 MODELOS FÍSICOS DE AMBIENTE URBANO GERADO ALEATÓRIAMENTE.	68
4. DETERMINAÇÃO DAS CARGAS SOBRE UM MODELO E SUA RELAÇÃO COM O VENTO INCIDENTE.	73
4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.	73
4.2 RELAÇÃO DAS FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO E AS VELOCIDADES FLUTUANTES DO ESCOAMENTO.	73
4.3 DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DO ENTORNO RUGOSO NAS PRESSÕES MEDIDAS NOS MODELOS.	77
4.4 VARIAÇÃO DOS MOMENTO DE FLEXÃO E TORÇÃO PROVOCADA PELA PRESENÇA DE OUTRAS EDIFICAÇÕES. .	77
4.5 ANÁLISE DA INTERAÇÃO ENTRE DOIS MODELOS POR MEIO DO QUOCIENTE DOS DESLOCAMENTOS MÁXIMOS. ..	85
4.6 INFLUÊNCIA DAS INTENSIDADES DE TURBULÊNCIA NA CARGA NO MODELO.	87
4.7 ANÁLISE DAS CARGAS DO VENTO CONSIDERANDO A INTERAÇÃO ENTRE DOIS MODELOS.	90
4.8 TRABALHOS CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DE MODELOS REALIZADOS NA UFRGS.	94
4.9 ANÁLISE DE VARIAÇÕES DE CARGA EM ESTRUTURAS BAIXAS PROVOCADAS POR ELEMENTOS RUGOSOS.	97
5. ANÁLISE DA CAMADA LIMITE NO TÚNEL DO VENTO. .	100
5.1 DESCRIÇÃO DO VENTO DE FUNDO.	100
5.2 VENTO INCIDENTE.	105

5.3 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA DE CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA EM AMBIENTE URBANO.	107
5.4 MEDIÇÃO DE VELOCIDADES MÉDIAS E FLUTUANTES QUANDO VARIA O ENTORNO IMEDIATO.	109
5.5 ANÁLISES DAS CARACTERÍSTICAS DE VELOCIDADES MÉDIAS INCIDENTES COM ESCOAMENTO DE FUNDO SUBURBANO.	111
5.6 ANÁLISES DAS CARACTERÍSTICAS FLUTUANTES DO VENTO INCIDENTE.	114
5.7 ESPECTRO DE POTÊNCIA DA COMPONENTE FLUTUANTE LONGITUDINAL DO ESCOAMENTO.	119
5.8 EFEITO DA VARIAÇÃO DO VENTO DE FUNDO.	121
5.8.1 Técnica experimental para determinar a direção média temporal no escoamento.	125
5.8.2 Análises de velocidades médias e flutuantes da componente longitudinal do vento incidente.	127
5.8.3 Espectro de potência da componente flutuante longitudinal.	132
5.9 DISCUSSÃO DE RESULTADOS.	134
6. CONSTRUÇÃO DE MODELO DINÂMICO DE ESTRUTURA ALTA PARA ENSAIO EM TÚNEL DE VENTO.	141
6.1 MODELOS DINÂMICOS.	144
6.1.1 Construção da Balança.	146
6.1.2 Condições de semelhança.	151
6.1.3 Construção dos modelos dinâmicos.	157
7. DETERMINAÇÃO DAS CARGAS EM ESTRUTURAS	

ALTAS, SEGUNDO OS CÓDIGOS DE VENTO.	164
7.1 NORMA BRASILEIRA NBR 6123 (NB – 599) 1987.	165
7.1.1 Método simplificado. Dados de ingresso para o cálculo.	165
7.1.2 Método estático. Dados de ingresso para o cálculo.	169
7.2 NORMA ARGENTINA CIRSOC 102 (NOVEMBRO 2002).	171
7.2.1 Cargas de vento de projeto sobre edifícios abertos e outras estruturas.	171
7.2.2 Cargas estáticas de vento de projeto sobre edifícios rígidos.	176
8. ENSAIO DINÂMICO EM TÚNEL DE VENTO DE ESTRUTURAS ALTAS EM AMBIENTE URBANO.	179
8.1 DETERMINAÇÃO DOS MOMENTOS DE FLEXÃO E DE TORÇÃO NA BASE.	179
8.2 COEFICIENTES DE MOMENTOS.	182
8.2.1 Coeficientes de momentos no modelo 3.	182
8.2.2 Coeficientes de momentos no modelo 2.	189
8.3 COMPARAÇÃO DE COEFICIENTES DE MOMENTO VARIANDO O ESCOAMENTO DE FUNDO E MANTENDO O ENTORNO.	192
8.3.1 Modelo 3.	192
8.3.2 Modelo 2.	194
8.4 RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS MODELOS FÍSICOS ($S_I - R_j$).	196
8.4.1 Modelo 3.	196
8.4.2 Modelo 2.	198
9. CONCLUSÕES.	207

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	209
---	------------

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1: Linha de Corrente em Torno de um Modelo.	49
Fig. 2.2: Perfis Verticais de Defeitos de Velocidade Média.	50
Fig. 2.3: Excesso da Intensidade da Turbulência na Esteira do Modelo.	51
Fig. 2.4: Modelos ensaiados no túnel de vento.	52
Fig. 2.5: Modelos ensaiados no túnel de vento.	53
Fig. 2.6: Modelos ensaiados no túnel de vento.	55
Fig. 3.1: Equipamento de simulação do ambiente urbano.	58
Fig. 3.2: Densidade de probabilidade da largura b_1	61
Fig. 3.3: Densidade de probabilidade da profundidade b_2	61
Fig. 3.4 Densidade de probabilidade da altura h	62
Fig. 3.5: Situação da estrutura na quarteirão do entorno rugoso.	65
Fig. 3.6: Modelos reduzidos simulados numericamente.	66
Fig. 3.7: 26 quarteirões de entorno urbano da cidade de Buenos Aires (Argentina), construído em escala de simulação 1/300	67
Fig. 3.8: Localização dos quarteirões na câmara de ensaio.	70
Fig. 4.1: Espectro da turbulência do escoamento turbulento a barlavento e lateral do modelo.	74
Fig. 4.2: Espectro das pressões flutuantes com modelo situado na esteira.	75
Fig. 4.3: Espectro das pressões flutuantes com modelo considerado isolado.	75
Fig. 4.4: Densidade espectral reduzida das pressões medidas sobre o modelo em Terreno aberto (1-7) e urbano (A-D).	76
Fig. 4.5: Ensaio do modelo principal isolado e com dois modelos.	78
Fig. 4.6: Ensaio do modelo principal isolado e com dois modelos.	79
Fig. 4.7: Função de densidade de probabilidade conjunta entre as cargas transversais e de torção.	81
Fig. 4.8: Espectro de potência de torção.	83
Fig. 4.9: Espectro do momento de torção para um modelo quadrado.	84

Fig. 4.10: Espectro de potência do momento de torção para um modelo de seção retangular com a face maior exposta ao vento.	85
Fig. 4.11: Modelos de ensaios.	86
Fig. 4.12: Medições de pressões superficiais ($I_t=12\%$).	88
Fig. 4.13: Espectro de pressões superficiais de um prisma ($I_t=12\%$).	88
Fig. 4.14: Variação do Coeficiente de arraste com S	89
Fig. 4.15: Variação do Coeficiente de força com a I_t	90
Fig. 4.16: Arranjo Experimental.	91
Fig. 4.17: Fator de Rajada para um modelo similar à estrutura de referência.	92
Fig. 4.18: Espectro de Força Normalizada com o modelo a sotavento na margem da esteira.	93
Fig. 4.19: Espectro de Força Normalizada modelo a sotavento sem separação lateral.	93
Fig. 4.20: Disposição Experimental dos modelos.	94
Fig. 4.21: Variação do Coeficiente do Momento de Torção com a separação do modelo.	95
Fig. 4.22: Variação do Coeficiente Máximo de Torção para escoamento suave (U) e turbulento(T).	96
Fig. 4.23: Variação do Coeficiente Máximo de Força para escoamento suave (U) e turbulento(T).	96
Fig. 4.24: Entorno Superficial do Modelo de Estrutura Baixa.	98
Fig. 5.1: Túnel de vento Prof. Jacek Gorecki.	101
Fig. 5.2: Perfil de velocidade média (Simulação S_{ub}).	103
Fig. 5.3: Variação da Intensidade da Turbulência com a altura (Simulação S_{ub}).	103
Fig. 5.4: Densidade de probabilidade da componente flutuante longitudinal (P_l).	103
Fig. 5.5: Função de autocorrelação da componente flutuante longitudinal (P_l).	103
Fig. 5.6: Espectros de potência da velocidade flutuante longitudinal (P_1, P_2 e P_3). .	104
Fig. 5.7: Espectro simplificado de potência da velocidade flutuante longitudinal (P_1, P_2 e P_3).	104

Fig. 5.8: Espectro teórico de Von Kármán ajustado ao espectro medido (P_1).	105
Fig. 5.9: Espectro com a macroescala da função de autocorrelação e teoria de Taylor (P_1).	105
Fig. 5.10: Simulações dos modelos físicos urbanos com densidade superficial real.	106
Fig. 5.11: Simulações dos modelos físicos urbanos com metade de densidade superficial real.	106
Fig. 5.12: Cata-vento de medição da direção do escoamento médio.	110
Fig. 5.13: Cata-vento posicionada no modelo físico.	110
Fig. 5.14: Anemômetro de fio quente.	111
Fig. 5.15: Velocidade média no centro do entorno imediato (P_1).	112
Fig. 5.16: Velocidade média no centro do entorno imediato (P_1).	112
Fig. 5.17: Velocidade média no centro do entorno imediato (P_2).	113
Fig. 5.18: Velocidade média no centro do entorno imediato (P_2).	113
Fig. 5.19: Velocidade média no centro do entorno imediato (P_3).	114
Fig. 5.20: Velocidade média no centro do entorno imediato (P_3).	114
Fig. 5.21: Intensidades da turbulência no centro do entorno imediato (P_1).	115
Fig. 5.22: Intensidades da turbulência no centro do entorno imediato (P_1).	115
Fig. 5.23: Desvio padrão no centro do entorno imediato (P_1).	115
Fig. 5.24: Desvio padrão no centro do entorno imediato (P_1).	115
Fig. 5.25: Densidade de Probabilidade da componente flutuante longitudinal (S30901).	116
Fig. 5.26: Densidade de Probabilidade da componente flutuante longitudinal (S50001).	116
Fig. 5.27: Intensidades da turbulência no centro do entorno imediato (P_2).	116
Fig. 5.28: Intensidades da turbulência no centro do entorno imediato (P_2).	116
Fig. 5.29: Desvio padrão no centro do entorno imediato (P_2).	117

Fig. 5.30: Desvio padrão no centro do entorno imediato (P_2).	117
Fig. 5.31: Intensidades da turbulência no centro do entorno imediato (P_3).	118
Fig. 5.32: Intensidades da turbulência no centro do entorno imediato (P_3).	118
Fig. 5.33: Desvio padrão no centro do entorno imediato (P_3).	119
Fig. 5.34: Desvio padrão no centro do entorno imediato (P_3).	119
Fig. 5.35: Densidade espectral Kármán ajustado a registro da velocidade S23001 (P_1).	120
Fig. 5.36: Densidade espectral Kármán ajustado a registro da velocidade S23001 (P_1) com macroscale determinado com a função de autocorrelação.	120
Fig. 5.37: Função de densidade espectral da componente flutuante de velocidade em níveis P_1 , P_2 e P_3 (S2300123).	121
Fig. 5.38: Modelo do espectro simplificado em níveis P_1 , P_2 e P_3 (S2300123).	121
Fig. 5.39: Perfil de velocidade média (Simulação R).	123
Fig. 5.40: Variação da intensidade da turbulência com a altura (Simulação R).	123
Fig. 5.41: Densidade de probabilidade da componente flutuante longitudinal (P_1). ..	123
Fig. 5.42: Função de autocorrelação da componente flutuante longitudinal (P_1).	123
Fig. 5.43: Espectros de potência da velocidade flutuante longitudinal (P_1 , P_2 e P_3). ..	124
Fig. 5.44: Espectro simplificado de potência da velocidade flutuante longitudinal (P_1 , P_2 e P_3).	124
Fig. 5.45: Espectro teórico de Von Kármán ajustado ao espectro medido (P_1).	124
Fig. 5.46: Espectro com a macroscale da função de autocorrelação e teoria de Taylor (P_1).	124
Fig. 5.47: Direções de vento incidente (P_1).	126
Fig. 5.48: Direções de vento incidente (P_1).	126
Fig. 5.49: Direções de vento incidente (P_2).	126
Fig. 5.50: Direções de vento incidente (P_2).	126
Fig. 5.51: Velocidades médias (P_1).	127

Fig. 5.52: Velocidades médias (P_1).	127
Fig. 5.53: Velocidades médias (P_2).	128
Fig. 5.54: Velocidades médias (P_2).	128
Fig. 5.55: Velocidades médias (P_3).	128
Fig. 5.56: Velocidades médias (P_3).	128
Fig. 5.57: Intensidades da turbulência no centro do entorno imediato (P_1).	129
Fig. 5.58: Intensidades da turbulência no centro do entorno imediato (P_1).	129
Fig. 5.59: Desvio padrão no centro do entorno imediato (P_1).	129
Fig. 5.60: Desvio padrão no centro do entorno imediato (P_1).	129
Fig. 5.61: Intensidades da turbulência no centro do entorno imediato (P_2).	130
Fig. 5.62: Intensidades da turbulência no centro do entorno imediato (P_2).	130
Fig. 5.63: Desvio padrão no centro do entorno imediato (P_2).	131
Fig. 5.64: Desvio padrão no centro do entorno imediato (P_2).	131
Fig. 5.65: Intensidades da turbulência no centro do entorno imediato (P_3).	131
Fig. 5.66: Intensidades da turbulência no centro do entorno imediato (P_3).	131
Fig. 5.67: Desvio padrão no centro do entorno imediato (P_3).	132
Fig. 5.68: Desvio padrão no centro do entorno imediato (P_3).	132
Fig. 5.69: Espectros de potência da velocidade flutuante longitudinal (P_1).	132
Fig. 5.70: Espectros de potência da velocidade flutuante longitudinal (P_1).	132
Fig. 5.71: Espectros de potência da velocidade flutuante longitudinal (P_2).	133
Fig. 5.72: Espectros de potência da velocidade flutuante longitudinal (P_2).	133
Fig. 5.73: Espectros de potência da velocidade flutuante longitudinal (P_3).	133
Fig. 5.74: Espectros de potência da velocidade flutuante longitudinal (P_3).	133
Fig. 5.75: Intensidade da turbulência e velocidade média medida em P_t para as	

simulações $S_{ub.i} - R_j$	136
Fig. 5.76: Relação entre o Fator de Rajada e o tempo de média em P_t para as simulações $S_{ub.i} - R_j$	136
Fig. 5.77: Relação entre IT e rajadas médias em 1 seg. para P_i nas simulações $S_{ub.i} - R_j$	137
Fig. 5.78: Relação entre IT e rajadas médias para todos os tempos em P_i nas simulações $S_{ub.i} - R_j$	137
Fig. 5.79: Relação funcional entre velocidade máxima e velocidade média.	138
Fig. 5.80: Relação funcional entre rajadas de vento e velocidade média.	138
Fig. 5.81: Espectro de velocidades proposto.	139
Fig. 5.82: Comparações das rajadas ($T=1s$).	140
Fig. 5.83: Comparações das intensidades da turbulência.	140
Fig. 6.1: Balança: célula de carga, extensômetros e equipamento de medição.	146
Fig. 6.2: Esquema físico para medir o momento de flexão longitudinal (Y) e transversal (X) ao modelo.	149
Fig. 6.3: Distribuição das tensões produzidas pelo momento de torção.	149
Fig. 6.4: Balança com extensômetro para medir os momentos.	150
Fig. 6.5: Equipamento da aquisição da variação temporal da resposta.	151
Fig. 6.6: Modelo 3 (120 m em protótipo).	159
Fig. 6.7: Modelo 2 (60 m em protótipo).	159
Fig. 6.8: Modelos dinâmicos de 40 e 20 cm respectivamente.	160
Fig. 6.9: Modelos dinâmicos de 20 cm com balança.	160
Fig. 6.10: Diagrama aceleração-tempo em vibração livre.	161
Fig. 6.11: Diagrama def. esp.-tempo em vibração livre.	161
Fig. 6.12: Espectro de potência da resposta do acelerômetro.	162
Fig. 6.13: Espectro de potência da resposta do extensômetro.....	162
Fig. 6.14: Diagrama aceleração-tempo em vibração livre.	162

Fig. 6.15: Diagrama def. esp.-tempo em vibração livre.	162
Fig. 6.16: Espectro de potência da resposta do acelerômetro.	163
Fig. 6.17: Espectro de potência da resposta do extensômetro.	163
Fig. 8.1: Modelo 3 no interior câmara de ensaio.	180
Fig. 8.2: Espectros da resposta longitudinal.	182
Fig. 8.3: Espectros da resposta transversal.	182
Fig. 8.4: C_{MY} versus α	182
Fig. 8.5: C_{MX} versus α	182
Fig. 8.6: η_Y versus C_{MY}	183
Fig. 8.7: η_X versus C_{MX}	183
Fig. 8.8: F_Y versus IT	184
Fig. 8.9: F_X versus IT	184
Fig. 8.10: F_Y versus \hat{V}	184
Fig. 8.11: F_X versus \hat{V}	184
Fig. 8.12: F_X versus IT	185
Fig. 8.13: F_X versus IT	185
Fig. 8.14: C_{MT} versus α	185
Fig. 8.15: MYS30003-MXS30003.	186
Fig. 8.16: MYS30903-MXS30903.	186
Fig. 8.17: MXS30903-MTS30903.	187
Fig. 8.18: MYS30903-MTS30903.	187
Fig. 8.19: Espectros MYS30903-MXS30903- MTS30903.	187
Fig. 8.20: MXS30003-MTS30003.	188
Fig. 8.21: MYS30003-MTS30003.	188
Fig. 8.22: Espectros MYS30003-MXS30003- MTS30003.	189

Fig. 8.23: Espectros da resposta longitudinal.	189
Fig. 8.24: Espectros da resposta transversal.	189
Fig. 8.25: $C_{\overline{MY}}$ versus α	190
Fig. 8.26: $C_{\overline{MX}}$ versus α	190
Fig. 8.27: η_Y versus $C_{\overline{MY}}$	190
Fig. 8.28: η_X versus $C_{\overline{MX}}$	190
Fig. 8.29: F_Y versus IT	191
Fig. 8.30: F_X versus IT	191
Fig. 8.31: $C_{\overline{MT}}$ versus α	191
Fig. 8.32: $C_{\overline{MY}}$ versus α	193
Fig. 8.33: $C_{\overline{MX}}$ versus α	193
Fig. 8.34: η_Y versus $C_{\overline{MY}}$	193
Fig. 8.35: η_X versus $C_{\overline{MX}}$	193
Fig. 8.36: $C_{\overline{MT}}$ versus α (S3-R3).	194
Fig. 8.37: $C_{\overline{MT}}$ versus α (S6-R6).	194
Fig. 8.38: $C_{\overline{MY}}$ versus α	194
Fig. 8.39: $C_{\overline{MX}}$ versus α	194
Fig. 8.40: η_Y versus $C_{\overline{MY}}$	195
Fig. 8.41: η_X versus $C_{\overline{MX}}$	195
Fig. 8.42: $C_{\overline{MT}}$ versus α (S3-R3).	195
Fig. 8.43: $C_{\overline{MT}}$ versus α (S6-R6).	195
Fig. 8.44: η_Y versus $C_{\overline{MY}}$	196
Fig. 8.45: η_X versus $C_{\overline{MX}}$	196

Fig. 8.46: F_Y versus IT	197
Fig. 8.47: F_X versus IT	197
Fig. 8.48: F_Y versus \hat{V}	198
Fig. 8.49: F_X versus \hat{V}	198
Fig. 8.50: η_Y versus C_{MY}	198
Fig. 8.51: η_X versus C_{MX} ..	198
Fig. 8.52: F_Y versus IT	199
Fig. 8.53: F_X versus IT	199
Fig. 8.54: F_Y versus \hat{V}	200
Fig. 8.55: F_X versus \hat{V} ..	200

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Valores médios, desvio padrão e correlações das variáveis obtidas nos quarteirões de Buenos Aires.	61
Tabela 3.2: Parâmetros de ajuste.	61
Tabela 3.3: Valores médios, desvio padrão e correlações das variáveis obtidas pelos modelos gerados numericamente nos quarteirões.	67
Tabela 3.4: Modelo Físico urbano S1-S2-S3.	71
Tabela 3.5: Modelo Físico urbano S4-S5-S6.	72
Tabela 4.1: Proporções dos aumentos as solicitações com relação ao modelo isolado.	95
Tabela 5.1: Macroescalas longitudinais de simulação S_{ub}	104
Tabela 5.2: Identificação das simulações.	106
Tabela 5.3: Macroescalas longitudinais de simulação R.	125
Tabela 5.4: Identificação das simulações.	125
Tabela 5.5: Valores médios e desvio padrão dos valores estatísticos.	135
Tabela 5.6: Parâmetros estatísticos.	135
Tabela 5.7: Parâmetros da relação $Rg(T) - T$	135
Tabela 5.8: Parâmetros da relação $Rg(T) - IT$	136
Tabela 5.9: Parâmetros da relação rajada- V média.	137
Tabela 5.10: Parâmetros do espectro proposto simplificado em P_1	138
Tabela 5.11: Parâmetros do espectro proposto simplificado em P_2	138
Tabela 5.12: Parâmetros do espectro proposto simplificado em P_3	139
Tabela 6.1: Dimensões dos modelos.	158
Tabela 6.2: Freqüências do protótipo e modelo.	160
Tabela 6.3: Freqüência fundamental dos modelos.	163
Tabela 7.1: Estrutura 3. Força e momento de flexão sobre protótipo dinâmico (NBR 6123).	167
Tabela 7.2 Estrutura 2 Força e momento de flexão sobre protótipo dinâmico (NBR 6123).	168

Tabela 7.3 Estrutura 3. Força e momento de flexão sobre protótipo estático (NBR 6123).	170
Tabela 7.4: Estrutura 2. Força e momento de flexão sobre protótipo dinâmico (NBR 6123).	171
Tabela 7.5: Estrutura 3. Força e momento de flexão sobre protótipo dinâmico (CIRSOC 102).	174
Tabela 7.6: Estrutura 2. Força e momento de flexão sobre protótipo dinâmico (CIRSOC 102).	175
Tabela 7.7: Estrutura 3. Força e momento de flexão sobre protótipo rígido (CIRSOC 102).	176
Tabela 7.8: Estrutura 2. Força e momento de flexão sobre protótipo rígido (CIRSOC 102).	177
Tabela 7.9: Momento e forças sobre modelo e protótipo 2.	178
Tabela 7.10 Momento e forças sobre modelo e protótipo 3.	178
Tabela 8.1: Características dos protótipos e modelos.	179
Tabela 8.2: Parâmetros de ajuste do fator de amplificação de momentos.	197
Tabela 8.3: Parâmetros de ajuste do fator de amplificação de momentos.	199
Tabela 8.4: Momentos médio longitudinal, transversal e de torção e momento máximo longitudinal e transversal medido na base dos modelos (Nm).	200
Tabela 8.5: Direção vento de fundo para os máximos momentos.	201
Tabela 8.6: Fator de amplificação e fator de pico de momento.	201
Tabela 8.7: Quocientes de momentos.	202
Tabela 8.8: Quociente de Momentos no modelo 2 e 3 respeito aos momentos do Código de vento Argentino.	205
Tabela 8.9: Quociente de Momentos no modelo 2 e 3 respeito aos momentos do Código de vento Brasileiro.	205

SÍMBOLOS

LETRAS ROMANAS MAIÚSCULAS:

A_i	Área de referência
A_{ref}	Área de referência constante, dado pelo produto da largura pela altura do modelo
B	Largura do modelo
$C_{\overline{MI}}$	Coefficiente médio adimensional de momento Longitudinal (I=Y), Transversal (I=X) ou Torção (I=T)
$C_{\dot{MI}}$	Coefficiente de momento máximo flutuante Longitudinal (I=Y), Transversal (I=X) ou Torção (I=T)
$C_i(t)$	Coefficiente de pressão aerodinâmica variável com o tempo
$C(r,0)$	Coefficiente de correlação com retardo temporal τ nulo
$C(0,\tau)$	Coefficiente de auto-correlação com retardo temporal τ
$C(r,\tau)$	Coefficiente de correlação com retardo temporal τ
$C(\Delta l,0)$	Coefficiente de auto-correlação cruzada com retardo temporal τ nulo
$F_i(t)$	Força provocada pelas flutuações da velocidade do vento
F_I	Fator de Pico de Momento Longitudinal (I=Y), Transversal (I=X) ou Torção (I=T)
H	Altura do modelo
H_{medio}	Altura médio dos obstáculos dos modelos físicos
Fd	Força de desenho
$F_i(t)$	Função de distribuição de probabilidade
I_T	Intensidade local da turbulência do componente longitudinal horizontal da velocidade média na direção do escoamento médio
$I_T(z)$	Intensidade local da turbulência
L	Coefficiente de Fatorização de Cholesky
L_T	Escala integral temporal

L_L	Escala integral espacial
P	Profundidade do modelo
L_{xa}	Macroscala longitudinal obtida com hipótese de Taylor
L_{xe}	Macroscala longitudinal obtida com ajuste do espectro de Kármán
P_{Xi}^{-1}	Inversa da função de distribuição das variáveis no domínio original
Md	Momento de desenho
\bar{M}_I	Momento médio Longitudinal (I=Y), Transversal (I=X), Torção (I=T)
R	Escoamento de fundo rural
R_i	Modelos Físicos de simulação do entorno urbano (i= 3, 6)
R_Z	Matriz de correlação no domínio Gaussiano
$S_{ub.}$	Escoamento de fundo suburbano
$S(n)$	Espectro de potência
S_i	Modelos Físicos de simulação do entorno urbano (i= 1, 2, 3, 4, 5, 6)
T	Intervalo de tempo
$V(z, t)$	Componente horizontal de velocidade instantânea do vento a uma altura z sobre o terreno
$\bar{V}(z)$	Componente horizontal longitudinal da velocidade média do vento à altura z
\bar{V}_{ref}	Velocidade média a uma altura de referência
\bar{V}_{10}	Velocidade média longitudinal do escoamento à altura de 10 m
$V^2(z)$	Valor Quadrado Médio
V_H	
V_V	
X	Direção transversal ao modelo (na direção da largura)
Y	Direção longitudinal ao modelo (na direção da profundidade)
Z	Variável Gaussiana não normalizada correlacionada

LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS:

b_1	Largura dos modelos
b_2	Profundidade dos modelos
b_{ref}	Largura do modelo
d_0	Altura de deslocamento do plano zero
f	Frequência natural de vibração dos modelos
h_{ref}	Largura do modelo
k	Coefficiente de arrasto superficial
$P2$	Parâmetro de ajustamento
p_1	Posição de medição na altura 1
p_2	Posição de medição na altura 2
p_3	Posição de medição na altura 3
p_{Xi}^{-1}	Inversa da função de densidade de probabilidade
q_{ref}	Pressão dinâmica de referência em região não perturbada à altura da coberta do modelo
u_*	Velocidade de fricção
\overline{uv}	Produto médio temporal das correlações
$v(r, t)$	Velocidade flutuante longitudinal horizontal do vento descontado a velocidade média na ubiquação r
$v(r, t + \tau)$	Velocidade flutuante longitudinal horizontal do vento descontado a velocidade média na ubiquação r retardada um tempo τ
$v(z, t)$	Velocidade flutuante longitudinal horizontal do vento descontado a velocidade média na altura z
x_i	Variável aleatória no domínio original
z	Altura acima do terreno
z_0	Comprimento de rugosidade

z_d	Deslocamento do plano zero
z_{ref}	Altura de referência
z_i	Variável aleatória
z_a	Média da variável aleatória z_i
z_*	Altura limite da subcamada rugosa

LETRAS GREGAS:

α	Direção do escoamento de fundo
χ	Constante de Von Kármán
δ	Espessura da camada limite simulada
φ	Parâmetro da função potencial da velocidade do vento
$\gamma(r, \tau)$	Coefficiente adimensionalizado de auto-correlação
$\gamma(l, \tau)$	Coefficiente de correlação cruzado normalizado
η_l	Fator amplificação de Momento Longitudinal (I=Y), Transversal (I=X) ou Torção (I=T)
λ	Longitude de onda
μ	Viscosidade do ar
$\theta^{-1}()$	Função inversa de distribuição Gaussiana Standar
\mathcal{G}	Longitude de escala
ρ	Massa específica do ar
$\sigma_1(z)$	Desvio padrão do componente instantâneo longitudinal do vetor velocidade
σ_{MI}	Desvio Padrão de coeficiente de momento flutuante
τ	tiempo de retardo de la señal registrada
ξ	Amortecimento estrutural
$\sigma(z)$	Desvio Padrão

$\sigma^2(z)$	Variância
$\sigma_1(z)$	Desvio padrão do componente instantâneo longitudinal do vetor velocidade
$\phi[\bar{z}(\bar{x}), Rz]$	Função de distribuição Gaussiana Standar correlacionada
$\rho_{z,ij}$	Fator de correlação normalizado no domínio Gaussiano
ρ_{ij}	Fator de correlação normalizado no domínio original

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, as ações exercidas pelo vento em edifícios altos são obtidas de procedimentos sugeridos por Normas de Vento, ou então, através de ensaios de modelos reduzidos em túnel de vento. A carga de vento estabelecida nos Códigos, via da regra, são obtidas a partir de ensaios em túnel de vento de modelos reduzidos, com geometria simples, considerando a edificação isolada e exposta a um escoamento deslizante e turbulento de características similares ao vento natural suburbano. Quando a forma da edificação é complexa, ou quando suas dimensões justificam o investimento, para assim aperfeiçoar o desenho estrutural, são realizados ensaios em túnel de vento.

Assim os ensaios em túnel de vento realizam-se para a estrutura em estudo, exposta a um escoamento deslizante e turbulento, denominado escoamento de fundo, caracterizado por parâmetros que dependem da rugosidade superficial ao entorno e definidos nos códigos como Categorias de Terrenos, considerando também as modificações introduzidas no escoamento de fundo pelo entorno superficial imediato à estrutura em estudo por meio da reprodução em escala das rugosidades circundantes.

Em ambos os casos, delineiam-se questões quanto à confiabilidade das cargas assim obtidas e aplicadas ao projeto de estruturas em escala natural. Os códigos de vento consideram a estrutura isolada e exposta a um escoamento em equilíbrio dinâmico com a rugosidade superficial sobre a qual percorre, de densidade constante em planta e forma homogênea. Este procedimento parece razoável quando a estrutura em estudo é várias vezes alta do que o entorno que a rodeia, mas não em outras situações.

O vento no interior da camada limite atmosférica é turbulento e as cargas sobre as construções são influenciadas pela distribuição espacial da turbulência. A distribuição do campo de velocidades médias e flutuantes é definida pela disposição das rugosidades superficiais que constituem o entorno imediato da estrutura em estudo.

Surry (1982), neste sentido, distingue dois tipos de campos de velocidades em uma simulação em túnel de vento: vento de fundo, simplificado no túnel como um escoamento turbulento desenvolvido sobre um terreno relativamente homogêneo, e o campo de velocidade, provocado pelo entorno detalhado do lugar em consideração. O escoamento de fundo produz

uma camada limite com propriedades médias similares ao escoamento atmosférico e o entorno próximo provê uma adequada estrutura do escoamento turbulento, modificando o escoamento de fundo e definindo as propriedades médias e flutuantes das velocidades de vento que incidem sobre o modelo.

Apesar de que as cargas assim determinadas consideram a influência do entorno, não contemplam a possibilidade de eventuais modificações na rugosidade superficial. Como antecedente, Blessmann e Riera (1979) citam o estudo realizado em túnel de vento por Harris [1934] com respeito à construção de duas torres próximas ao Empire State Building. Concluiu que a construção das torres incrementaria em 200% a torção causada pelo vento. Novamente apresenta-se a questão com respeito à validade das cargas determinadas no túnel de vento com reprodução do “entorno real” e as provocadas pelo vento quando se modifica seu entorno superficial. Da revisão bibliográfica, os autores sugerem que os coeficientes aerodinâmicos para estruturas altas, determinadas através de ensaios em túnel de vento, devam contemplar a possibilidade da influência de futuras estruturas situadas ao seu redor.

Neste trabalho de pesquisa propõe-se uma metodologia, através de ensaios em túnel de vento, para determinar as cargas sobre modelos de estruturas altas situadas em centros urbanos considerando a distribuição aleatória do entorno superficial.

Assim, visando à determinação de cargas sobre estruturas situadas em centros urbanos, produzir-se-á, em primeiro lugar o campo de velocidades de fundo, terreno tipo suburbano e definido pelo Código Brasileiro NBR/6123 Terreno Categoria IV.

Posteriormente, adicionar-se-á o entorno superficial na vizinhança do modelo. Supõe-se que às estruturas possam assimilar formas geométricas prismáticas de seção transversal quadrada ou retangular, ficando assim definidas as suas dimensões através de três variáveis aleatórias (largura, profundidade e altura) e suas correlações. Determinar-se-ão os parâmetros estatísticos que definem as funções probabilísticas através do ajuste de expressões matemáticas aos dados obtidos do relevamento de estruturas construídas em centros urbanas.

Foram construídos dois modelos que reproduzem os primeiros modos de vibração de prédio com dimensões transversais iguais às médias estatísticas obtidas das estruturas construídas e com alturas de dois e quatro vezes a altura média. Mediram-se na base os momentos no sentido longitudinal, transversal e de torção, médios e flutuantes com modelo isolado, para

comparar com os valores obtidos dos códigos de vento Brasileiro e Argentino, posicionados em entornos superficiais urbanos.

Para atingir os objetivos deste estudo foram construídos em escala 1/300 seis modelos físicos de 26 quarteirões, que reproduzem os parâmetros básicos da rugosidade superficiais do microcentro da cidade de Buenos Aires (Argentina). Os modelos foram ensaiados no túnel de vento de camada limite da Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste (U.N.N.E., Argentina).

A estrutura da camada limite foi analisada em sua parte inferior, verificando-se que o campo de velocidade em centro urbano é nitidamente tridimensional e que a direção do vento de fundo influi no campo. Assim sendo, sugere-se um espectro de potência para análise dinâmica de edifícios de grande altura expostos à ação do vento urbano. Adicionalmente, se formulam recomendações referentes à variação da velocidade média e à componente longitudinal da intensidade da turbulência. Os resultados obtidos indicam que os momentos médios são inferiores aos obtidos com os códigos de vento analisados. Não obstante, os momentos flutuantes medidos nos ensaios no túnel de vento são sensivelmente superiores aos obtidos com os regulamentos de vento.

Isto sugere que os momentos flutuantes não são adequadamente avaliados pelos códigos de vento. Como os códigos adotam escoamento turbulento com perfis de direção única em altura, em equilíbrio dinâmico com as rugosidades superficiais do entorno, ao considerar a participação estrutural na amplificação da carga, com rugosidades superficiais aleatórias, os valores medidos nos ensaios no túnel de vento são superiores aos esforços obtidos ao se aplicar os códigos de vento.

2. ANÁLISE DO VENTO ATMOSFÉRICO EM ÁREAS URBANAS NA ENGENHARIA ESTRUTURAL

2.1 DESCRIÇÃO DO VENTO ATMOSFÉRICO

A superfície terrestre, em contato com as massas de ar que se movimentam, provoca um efeito retardador sobre as camadas inferiores do escoamento atmosférico gerando uma variação vertical de velocidades do vento. A partir da altura onde o efeito do solo é desprezível, a velocidade média do vento permanece invariante, denominadas altura e velocidade gradiente. A altura gradiente varia conforme diferentes autores entre 300 e 600 m sobre o nível do solo. A região do ar compreendida entre a superfície terrestre e a altura gradiente denomina-se camada limite atmosférica.

O vento no interior da camada limite atmosférica constitui um escoamento turbulento cuja descrição realiza-se com as ferramentas da teoria de processos aleatórios. As cargas provocadas sobre as estruturas são relevantes quando há altas velocidades de vento. A agitação originada pela fricção superficial é superior em relação à provocada por gradientes térmicos atmosféricos, destruindo desta maneira o processo de convecção. As condições atmosféricas nos ventos fortes são de gradiente térmico vertical adiabático e estabilidade neutra. Sob estas condições, a turbulência contida no escoamento médio do ar é causada pelo movimento da massa de ar sobre rugosidades superficiais (turbulência mecânica) e sua característica depende da forma, dimensão e distribuição de obstáculos superficiais naturais e artificiais.

O modelo físico do vento de alta velocidade proposto pelos códigos de vento é composto pelo escoamento médio de direção horizontal provocado por um sistema de pressão em grande escala ao qual se sobrepõem flutuações geradas pela rugosidade superficial local. É de esperar que se a superfície rugosa permanecesse razoavelmente constante por alguns quilômetros a barlavento da estação de medição, produzir-se-ia um equilíbrio dinâmico entre o aumento uniforme da velocidade com a altura até a velocidade gradiente, com o déficit de energia cinética representado pela soma da energia cinética transferida do escoamento médio às

flutuações de velocidade e o trabalho realizado pelo escoamento ao movimentar-se sobre as rugosidades superficiais.

O equilíbrio dinâmico entre as massas de ar produz perfis verticais de velocidades que permitem caracterizar os escoamentos médios com parâmetros que dependem das características da rugosidade superficial e descrever também o comportamento espacial da turbulência.

Embora exista abundante bibliografia sobre a estrutura do escoamento médio e flutuante do vento atmosférico, definem-se hipóteses e conceitos básicos utilizados na Engenharia do Vento que se utilizam neste trabalho.

2.2 VENTOS FORTES

Blessmann (1995) denomina tormenta os sistemas meteorológicos que provocam ventos em alta velocidade (fortes), independente de qual seja o mecanismo de formação. Em caso de tormentas de origem extra-tropicais ou simplesmente tormentas EPS (“extended mature pressure systems”) e com ventos de alta velocidade, a rugosidade superficial gera turbulências de tal intensidade que a mistura do ar entre as camadas adjacentes impede o processo de convecção. O gradiente térmico vertical é considerado adiabático e a estabilidade neutra. Desta forma, as flutuações são originadas pela agitação mecânica do ar, formando redemoinhos de dimensões diversas. Os ciclones extra-tropicais, considerados na Engenharia do Vento como ventos bem comportados, geram ventos fortes em equilíbrio dinâmico com a rugosidade superficial. Estes são os ventos mais estudados e servem como base aos códigos de vento.

Em outras tormentas as flutuações de vento são principalmente de origem térmica (tormentas elétricas ou TS, tornados entre outras). Isto impede a aplicação do conceito de vento em equilíbrio dinâmico com a rugosidade da superfície terrestre, devido à reduzida extensão superficial horizontal que abarca estes fenômenos meteorológicos.

2.3 ALEATORIEDADE DO VENTO NATURAL.

Do processamento dos dados correspondentes a registros de velocidades de vento desprende-se dois aspectos básicos: a) a variação da velocidade do vento ocorre em escalas temporais que variam entre várias horas até frações de segundos e b) que estas variações são complexas e irregulares.

A hipótese de Reynolds expressa a velocidade do escoamento turbulento como a adição de uma velocidade média e outra flutuante (2.1) (Blessmann, 1986 b). Portanto, seria factível a existência de parâmetros que descreveriam o comportamento do escoamento médio e outros do componente flutuante.

$$V(z,t) = \bar{V}(z) + v(z,t) \quad (2.1)$$

Sendo $V(z,t)$ a velocidade instantânea do vento a uma altura z sobre o terreno, $\bar{V}(z)$ a velocidade média em um intervalo de tempo T e $v(z,t)$ a flutuação de velocidade do vento em relação à média.

2.3.1 Variação da Velocidade Média com a Altura

Os desenvolvimentos apresentados a seguir estão restritos a ventos fortes em estabilidade neutra. Para este tipo de vento, a velocidade média na camada limite atmosférica varia de zero na superfície até a velocidade gradiente à altura gradiente. Descreve-se usualmente a variação da velocidade média com a altura com “Lei Logarítmica” (Hinze, 1959). Obtêm-se esta Lei por aplicação da segunda Lei de Newton sobre o movimento de uma massa de ar em contato com a superfície, escoamento médio unidirecional, adimensionalizada por parâmetros convenientemente escolhidos, considerando a influência da flutuação de velocidades em suas componentes flutuante horizontal e vertical, escoamento turbulento e válido até 15% da espessura da camada limite atmosférica (aproximadamente 100 m). A expressão da Lei Logarítmica é a seguinte:

$$\frac{\bar{V}(z)}{u_*} = \frac{1}{\chi} \ln \frac{(z - z_d)}{z_0} \quad (2.2)$$

Sendo $\bar{V}(z)$ a velocidade média do vento na direção do escoamento em uma altura z acima do terreno, z_d deslocamento do plano zero (altura até onde o escoamento depende dos obstáculos individuais), z_0 comprimento de rugosidade (função do tipo de terreno considerado), χ a constante de Von Kármán e u_* a velocidade de fricção.

A velocidade de fricção é a velocidade teórica de adimensionalização que se define como:

$$u_* = \sqrt{\overline{uv}} \quad (2.3)$$

Sendo \overline{uv} o produto médio temporal das correlações em um ponto da componente das flutuações do vetor de velocidade na direção longitudinal e transversal ao escoamento.

Outra expressão empírica que se adapta aos dados experimentais e difundida amplamente no âmbito da engenharia estrutural, é a Lei Potencial de Velocidades Médias que expressa:

$$\frac{\bar{V}_{(z)}}{\bar{V}_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\varphi \quad (2.4)$$

Sendo $\bar{V}_{(z)}$ a velocidade média do vento na direção do escoamento em relação à altura z , \bar{V}_{ref} a velocidade média a uma altura de referência z_{ref} e φ o parâmetro que caracteriza o perfil de velocidade em função da rugosidade do terreno onde se realiza a medição. Blessmann (1986) apresenta dados de perfis de ventos medidos em diferentes lugares, obtendo valores estimativos do expoente φ para cada tipo de rugosidade superficial.

2.3.2 Análise Estatística das Velocidades Instantâneas

Para estudar as cargas dinâmicas do vento é necessário dispor da descrição da variação de rajadas em espaço e tempo. A irregularidade das flutuações impede o tratamento determinístico, devendo-se estudá-las com base na Teoria da Probabilidade e as médias estatísticas. As flutuações de velocidades são aleatórias porque podem definir-se como a

seqüência infinita de registros ou amostras (rajadas diferentes no espaço e no tempo). No entanto, se o número de amostras fosse suficientemente grande, as velocidades poderiam apresentar certa regularidade estatística.

O processo aleatório é estacionário se seus valores estatísticos (média, desvio padrão, autocorrelação, etc.) permanecerem constantes em todas as amostras representativas do evento analisado e forem constantes para qualquer translação da origem do tempo. O processo aleatório é ergódico se qualquer estatístico calculado sobre um conjunto de registros possíveis for idêntico ao correspondente calculado ao longo do tempo em qualquer registro representativo do processo. No âmbito da engenharia civil admite-se que a velocidade do vento se comporta como um processo ergódico (Blessmann, 1986 b.). A seguir apresentam-se as expressões que serão utilizadas para caracterizar o componente flutuante longitudinal do vetor de velocidade de rajada, expresso como $v(z,t)$. O Laboratório de Aerodinâmica da Faculdade de Engenharia da Universidad Nacional del Nordeste dispõe de um sensor de anemômetro de fio quente para medir velocidades flutuantes, que registra o componente flutuante do vetor de velocidade do vento normal à orientação do fio.

Desta forma a análise somente compreenderá a componente flutuante longitudinal na direção do escoamento médio. Os subíndices situados depois do símbolo de velocidade para denotar o componente do vetor de velocidade analisado, não serão utilizados, pois se referirão sempre à componente horizontal de velocidade em direção ao escoamento médio.

Velocidade Média

A velocidade média do vento define-se como:

$$\bar{V}(z) = \frac{1}{T} \int_0^T V(z,t) dt \quad (2.5)$$

Valor Quadrático Médio ou Variância

$$\sigma_{(z)}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T v^2(z,t) dt \quad (2.6)$$

na qual $v(z,t)$ está definido na eq. (2.1).

Desvio Padrão

$$\sigma(z) = \left(\frac{1}{T} \int_0^T v^2(z, t) dt \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.7)$$

Intensidade Local da Turbulência

Define-se a Intensidade Local da Turbulência como o quociente entre o desvio padrão da componente flutuante e a velocidade média, correspondentes ambos à componente horizontal coincidente com a direção do escoamento médio longitudinal, medido a uma mesma altura.

$$I_T(z) = \frac{\sigma_1(z)}{\bar{V}(z)} \quad (2.8)$$

Sendo $\sigma_1(z)$ o desvio padrão da componente instantânea longitudinal do vetor velocidade de vento com a altura z , a intensidade local da turbulência representa uma medida das flutuações de velocidades com relação ao valor médio.

Com base em medições realizadas sobre terreno natural em campo aberto, Harris (1970) concluiu que o desvio padrão é aproximadamente constante até $z = 180m$, sendo que o seu valor depende do tipo de terreno analisado.

Escalas da Turbulência. Função de Correlação

As funções de correlação podem ser expressas no domínio do espaço ou do tempo. A correlação temporal descreve a periodicidade das rajadas e a correlação espacial analisa a não uniformidade da ação das rajadas no espaço. Quando a função de correlação temporal se define em um mesmo ponto, denomina-se Função de Autocorrelação e descreve a dependência entre o valor de uma das componentes da flutuação em um instante de tempo t e outro instante de tempo $t + \tau$, da mesma componente e em um mesmo ponto.

A expressão matemática que a define é a seguinte:

$$C(r, \tau) = \frac{1}{T} \int_0^{\infty} v(r, t) * v(r, t + \tau) d\tau \quad (2.9)$$

Sendo $C(r, \tau)$ o coeficiente de correlação na altura r com relação ao sinal que será registrado um tempo τ depois, $v(r, t)$ a componente de velocidade flutuante longitudinal medida a uma altura r e $v(r, t + \tau)$ a componente de velocidade flutuante longitudinal medida na mesma altura um tempo τ depois.

Esta correlação pode ser expressa de forma adimensionalizada (normalizada) como:

$$\gamma(r, \tau) = \frac{C(r, \tau)}{C(r, 0)} \quad (2.10)$$

Sendo $\gamma(r, \tau)$ o coeficiente adimensionalizado de auto-correlação medido a uma altura r para um tempo de retardo τ e $C(r, 0)$ o coeficiente de auto-correlação na mesma altura para um tempo de retardo τ nulo.

A expressão da auto-correlação permite associar as rajadas a uma memória temporal, também denominada escala integral temporal (L_T). Se o tempo de retardo τ for menor que a escala integral ($\tau < L_T$) as medições prevêm uma razoável informação com respeito o valor de τ segundos posteriores e pouca se $\tau > L_T$.

$$L_T = \int_0^{\infty} \gamma(r, \tau) d\tau \quad (2.11)$$

Ademais da escala temporal define-se a escala espacial da turbulência, denominada escala integral espacial L_L . A escala integral longitudinal da turbulência se define como a área sobre a curva de correlação cruzada normalizada e escreve-se:

$$L_L = \int_0^{\infty} \gamma(l, \tau) d\tau \quad (2.12)$$

sendo $\gamma(l, \tau)$ o coeficiente de correlação cruzada normalizado, entre dois pontos separados de uma distância l e um tempo de retardo τ .

Quando Taylor estudou a turbulência gerada por uma malha uniforme de barras em túnel aeronáutico observou que os vórtices, em escoamentos suaves, deslizam-se por certa distância, à velocidade média do vento correspondente à altura em estudo, sem que se produzam alterações sensíveis na estrutura do escoamento turbulento.

Diferentes estudos teóricos e experimentais demonstraram a validade da hipótese de Taylor se a turbulência contida no escoamento não for muito elevada. A hipótese de Taylor relaciona a escala longitudinal com a escala temporal. Esta hipótese, chamada hipótese da turbulência congelada, permite expressar:

$$C(\Delta l, 0) = \frac{1}{T} \int_0^{\infty} v(l, t) * v(l + \Delta l, t) dt \quad (2.13)$$

A autocorrelação cruzada, para um tempo de retardo nulo da componente flutuante longitudinal, em dois pontos afastados uma distância Δl na direção do vento médio, é igual à autocorrelação para um tempo de retardo τ , expressado:

$$C(0, \tau) = \frac{1}{T} \int_0^{\infty} v(r, t) * v(r, t + \tau) dt \quad (2.14)$$

medida em um ponto, com um tempo de retardo τ dado por

$$\tau = \frac{\Delta l}{\bar{V}(r)} \quad (2.15)$$

Resumindo

$$C(\Delta l, 0) = C(0, \tau) \quad (2.16)$$

A (2.16) permite determinar a escala integral longitudinal, a partir da autocorrelação em um ponto, sempre que conhecermos a escala integral, mediante a relação seguinte:

$$L_L(z) = L_T * \bar{V}(z) \quad (2.17)$$

Espectro de potência

O sinal das flutuações de velocidades está composto de rajadas não periódicas e infere-se que a não contribuição do sinal harmônico simples deve provir de uma categoria contínua e não do conjunto discreto de componentes de harmônicas. O espectro de potência $S(n)$ se define $S(n_0)\Delta n$ é a contribuição à variação total do sinal proveniente da componente harmônica simples, na frequência n_0 e em uma largura de banda Δn do espectro contínuo, assim:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} S(n) dn \quad (2.18)$$

Desta maneira Davenport, analisando a estrutura turbulenta das rajadas em ventos fortes concluiu que, o espectro de potência da componente longitudinal das rajadas medidas em vários lugares e a diferentes velocidades médias horárias, adapta-se à expressão empírica que contém como parâmetros a velocidade média horária a 10 m de altura e o coeficiente de arrastamento superficial (k):

$$nS(n) = 4k\bar{V}_{10}^2 \phi\left(n\mathcal{G}/\bar{V}_{10}\right) \quad (2.19)$$

dando uma forma explícita para ϕ . Nesta expressão \mathcal{G} (longitude de escala) é uma longitude arbitrária, para a qual Davenport sugere 1200m. A expressão geral dada por Davenport é:

$$\frac{nS(n)}{u_*^2} = 4 * \frac{x^2}{(1+x^2)^{4/3}} \quad (2.20)$$

com $x = \mathcal{G}n/\bar{V}_{10}$.

Harris (1970) propõe:

$$\frac{nS(n)}{u_*^2} = 4 * \frac{x}{(1+x^2)^{5/6}} \quad (2.21)$$

com $x = \mathcal{G}n/\bar{V}_{10}$ e $\mathcal{G}=1800$ m.

O espectro de potência fornece no domínio da frequência informação suficiente para abordar grande parte dos problemas estruturais. Além disso, estas frequências, relacionadas com a hipótese de turbulência congelada de Taylor, podem ser vinculadas às dimensões de redemoinhos.

Estudos recentes sobre espectros de registros temporais de velocidades de ventos atmosféricos, em terrenos aberto e urbano, demonstraram que, para o primeiro, o ajuste das expressões teóricas propostas sub-estima na região de baixas frequências, e para o terreno urbano acontece o mesmo na região inercial (alta frequência).

Como o espectro de potência e a função de autocorrelação constituem um par de transformada de Fourier, Harris (1970) obteve a escala integral temporal de turbulência como a integral do espectro de potência, chegando a:

$$L_T(r) = 0.084 \frac{\mathcal{G}}{\bar{V}_{10}} \quad (2.22)$$

Como \mathcal{G} é uma constante, conclui-se que $L_T(r)$ não varia com a altura.

2.4 CAMADA LIMITE EM AMBIENTE URBANO.

Kato et al. (1992) descrevem os resultados de medições de velocidades correspondentes a vento atmosférico em ambiente urbano, concluindo que os valores de Intensidade da Turbulência foram superiores aos recomendados pelo Building Design Loads para ambientes caracterizados por uma potência correspondente ao perfil de velocidades médias de 0,3 em 10 até 15% para alturas menores aos 100m.

A expressão proposta para a intensidade da turbulência foi:

$$I_T = 40 \left(\frac{10}{z} \right)^\varphi \quad (2.23)$$

Para $z > 30\text{m}$, sendo constante $I_T = 0,287$ para $z \leq 30 \text{ m}$, sendo φ igual à potência correspondente à categoria de terreno analisado. No entanto, a forma da densidade espectral da velocidade flutuante da componente longitudinal do vento concorda com a forma do espectro proposto por Kármán.

Maruyama e Ishizaki (1988), para compreender a estrutura do escoamento turbulento, apresentaram medições correspondentes a uma simulação do entorno urbano formado por cubos em túnel de vento com escala de simulação de 1/250. As técnicas desenvolvidas para simular em túnel de vento categorias de terreno consistem em situar corrente acima da posição de medição, sobre o piso do túnel, barreiras, blocos, geradores de turbulência, pedras, de maneira uniforme ou aleatória, para gerar um escoamento que reproduza a variação em altura das velocidades médias e os estatísticos que descrevam a turbulência de maneira semelhante à produzida na atmosfera.

As cargas medidas no túnel e convenientemente adimensionalizadas, trasladam-se ao protótipo aplicando a teoria dimensional e cumprindo as leis da semelhança. No entanto, medições de velocidades médias e flutuantes do vento atmosférico em ambiente urbano indicaram que as características do vento variam espacialmente, de maneira sensível, dependendo, principalmente, do entorno superficial imediato à estrutura em estudo; provocando inconvenientes para definir os parâmetros característicos do escoamento correspondente a terrenos urbanos.

As técnicas desenvolvidas para reproduzir escoamentos turbulentos, semelhantes ao escoamento em escala natural, baseiam-se em que os obstáculos postos no piso do túnel devam reproduzir a rugosidade superficial na escala geométrica adequada. Quando o terreno corresponde a centro urbano, a generalização de resultados de velocidades para caracterizar este tipo de terreno está condicionada pelas características do entorno superficial imediato à posição de medição, o que foi notado por Maruyama quando explicou que as condições do escoamento em ambiente urbano variam sensivelmente quando varia a situação do sensor. Isto acontece quando o entorno superficial tem grandes dimensões, provocando modificações no escoamento, com obstáculos cujo afastamento, dimensão e distribuição de densidade superficial em planta são aleatórios.

Maruyama, para analisar escoamentos turbulentos em ambiente urbano, recriou entornos superficiais, analisando somente o efeito da variação da densidade dos obstáculos em planta, modificando 12 aos 25%, mantendo uniforme as formas.

Os resultados demonstraram que a direção do escoamento médio varia entre as disposições rugosas, e torna difícil obter medições de velocidades flutuantes, quando o anemômetro de fio quente possui um canal único de medição. Se o eixo longitudinal do sensor não estivesse alinhado na direção do escoamento médio, as flutuações de vento registradas não se corresponderiam com as flutuações da componente longitudinal horizontal na direção do escoamento médio. Ao mesmo tempo, quando o sensor está situado na esteira do modelo, a direção do escoamento médio varia de maneira periódica. Conclui que, para analisar velocidades de vento em altura de cobertura urbanas (“urban Canopy”), precisa-se de estudos adicionais, posto que a velocidade depende da configuração, tamanho e densidade superficial de elementos rugosos.

Medições de velocidade de vento atmosférico em escala natural em terreno a campo aberto realizadas por Bao-Shi Shiau e Yuan-Bin Chen (2002) confirmaram que, para esta categoria de terreno, o espectro adimensionalizado de velocidade longitudinal de vento coincide com a expressão de Kármán.

Considerando que as cargas provocadas pelo vento sobre uma estrutura dependem das características do perfil de vento incidente que fica definido pelo entorno superficial, Cheng-Hsin Chang e Meroney (2003) analisam o efeito produzido sobre o perfil de vento e transitivamente, sobre a carga, em uma estrutura baixa, com entornos superficiais de separação variável, concluindo que as distribuições dos coeficientes de pressão dependem da separação das rugosidades superficiais.

Theurer, Baehlin e Plate (1992) analisaram em túnel de vento as perturbações introduzidas no campo de velocidades médias e flutuantes sobre obstáculos superficiais de formas, densidade e separação variável. Distinguem-se três regiões de escoamento diferenciadas: camada de altura de coberturas (*canopy layer*) na qual o escoamento é influenciado por obstáculos superficiais, escoamento altamente turbulento e tridimensional até duas vezes a altura dos modelos, o escoamento médio é afetado, principalmente, pela disposição de obstáculos superficiais; camada superficial (*surface layer*), com cisalhamento constante, na qual se produz o intercâmbio de quantidade de movimento entre camada exterior e camada coberta, a intensidade de turbulência aumenta quando acrescentarmos a densidade e variedade dos obstáculos superficiais; finalmente, estende-se a camada exterior (*outer layer*), na qual o escoamento médio não percebe a influência de obstáculos superficiais.

Os estudos de escoamentos em zonas urbanas demonstraram que as construções densamente agrupadas afetam as características do escoamento na zona mais baixa da camada limite atmosféricas. Os perfis de velocidades de vento e intensidade de turbulência dependem da sua situação, mais ainda nas áreas densamente povoadas, quando a rugosidade superficial é mais homogênea e uniforme, as variações entre os perfis de velocidade e intensidade da turbulência se reduzem sensivelmente. A variação na altura de velocidades médias e os valores estatísticos da turbulência são influenciados pela disposição de obstáculos superficiais, formas geométricas, separação em planta, direção do escoamento médio e densidade superficial.

Theurer et. al (1992) analisam as perturbações situando obstáculos com separação e alturas variáveis. Conclui que, quando a altura das rugosidades é uniforme, com alta densidade

superficial, gera-se um escoamento à altura dos obstáculos, com elevado acréscimo de velocidade média, para altura maiores que as rugosidades superficiais. Este efeito se manteve ainda para as densidades superficiais menores. Quando se introduziram rugosidades superficiais de altura não uniforme, observou-se que a velocidade média se reduziu a uma altura superior aos obstáculos.

A intensidade da turbulência entre modelos com a mesma densidade superficial, com obstáculos de altura constante e variável, permaneceu com valores mais ou menos constantes no primeiro e com variações significativas no segundo caso respectivamente. Plate (2000) analisa a estrutura do vento em áreas urbanas. A camada limite urbana totalmente desenvolvida está constituída pela camada de altura de cobertura (*canopy layer*) e a camada superficial (*surface layer*). Nesta última, o cisalhamento é constante e a variação de velocidades médias em altura se adapta à forma logarítmica. Entre as duas existe uma camada de difusão turbulenta, na qual as flutuações de velocidade são afetadas, principalmente, pelas características do escoamento na esteira de obstáculos superficiais. Gradativamente, nessas camadas, a diferença de pressão a barlavento e sotavento, na base das estruturas, com o acréscimo de altura, torna-se tensão de corte no interior da camada de pressão constante.

Na região superior da camada de difusão turbulenta, os obstáculos superficiais não influem na variação em altura de velocidades médias, nem nos parâmetros estatísticos que definem o comportamento de velocidades flutuantes. A camada de difusão em ambientes urbanos exigiu, no início, que as velocidades médias utilizadas para caracterizar este ambiente se medissem a altura elevada. Medições posteriores, em escala natural e ensaios em túnel de vento, demonstraram que a representação do contorno de velocidades através da lei logarítmica, em ambiente caracterizado por rugosidades superficiais altas, está bem justificada.

Quando Plate se refere às cargas de vento em áreas urbanas conclui que as pesquisas sobre corpos de geometria simples demonstraram que as máximas cargas médias se obtiveram quando situaram o modelo isolado e exposto a escoamento uniforme ou de camada limite, excluindo da análise as forças flutuantes provocadas por esteiras ou efeitos de interferência.

Rotach (1999) introduziu conceitos adicionais na descrição do desenvolvimento da camada limite turbulenta em ambiente urbano. O trabalho se limita ao estudo da camada limite totalmente desenvolvida em área urbana, sem considerar o efeito provocado na estrutura turbulenta do escoamento, quando passarmos de um terreno rural a um terreno urbano. Mostra

que para analisar a estrutura turbulenta do escoamento, é necessário introduzir o conceito de subcamada rugosa em correspondência com a subcamada viscosa do escoamento de camada limite sobre superfície lisa.

À diferença da última, considerar a sua presença implica que a extensão vertical se estende por várias dezenas de metros, demonstrando que não é desprezível. Rotach especifica que esta subcamada rugosa se desenvolve adjacente à superfície, onde a turbulência e o escoamento médio são influenciados pelos obstáculos superficiais individuais.

Deve-se considerar também que as velocidades utilizadas para determinar a pressão dinâmica de cálculo em centros urbanos, predizem-se a partir de velocidades obtidas em aeroportos que fiquem perto dos centros, com rugosidade superficial correspondente a terreno de campo aberto.

2.4.1 Revisão de trabalhos que descrevem modificações no escoamento nas vizinhanças de obstáculos superficiais

Em ambientes urbanos, o vento incidente, sobre uma estrutura, nasce da interação da massa de ar com os obstáculos superficiais situados a barlavento da estrutura principal. Até hoje, no conhecimento do autor, não se realizaram estudos sistemáticos para caracterizar um contorno de vento em ambientes urbanos levando em conta os obstáculos superficiais que constituem o entorno como variável aleatória, dependente da disposição, dimensões, separação, densidade em planta e formas geométricas dos obstáculos superficiais. As caracterizações das velocidades em ambientes urbanos, referem-se a casos específicos de entornos ambientais urbanos ou simplesmente se situam os modelos em forma aleatória que procurariam reproduzir um ambiente urbano, mas sem possuir um apoio matemático que o sustente.

Um dos fenômenos originados, quando um escoamento incide sobre estruturas, é a geração de esteiras a sotavento das construções. No interior das esteiras desenvolve-se um campo de velocidades que adquire propriedades dinâmicas diferentes das do escoamento turbulento de fundo. Esta nova estrutura turbulenta incide sobre os demais obstáculos situados a sotavento. Como consequência, as cargas provocadas pelo vento serão principalmente dependentes da estrutura turbulenta das esteiras.

Uma forma simplificada de analisar os fenômenos aerodinâmicos presentes na esteira, consiste em avaliar as diferenças entre os valores das propriedades do escoamento médio e flutuante medido a sotavento de um modelo e as propriedades do escoamento sem ele. Depois, mediante a análise das diferenças obtidas, determina-se a área de influência da esteira.

Devido aos altos custos, a maioria dos estudos se realiza em situações controladas (túnel de vento). No entanto, Peterka, Meroney e Kothari (1985) mencionam que a informação mais completa em escala natural foi realizada por Colmer (1971 apud Peterka et al., 1985), que estudou a esteira gerada em cima do Royal Aircraft Establishment de Bedford. O trabalho consistiu em medir velocidades, espectros e correlações cruzadas em 11 torres, dispostas ao redor do hangar de 10m de altura e 30m de largura. Analisando os dados obtidos, concluiu que as perturbações na esteira desaparecem a uma distância de aproximadamente 15 vezes altura da construção. Outras medições realizadas em escala natural, para analisar o conforto de pedestres, descrevem velocidades próximas ao edifício em pontos isolados e não permitem contribuir para uma maior compreensão das características do escoamento próximo ao edifício.

Este fenômeno tem sido abordado por prestigiosos investigadores que estudaram experimentalmente em ensaios em túnel de vento e de modo simples, o campo de velocidades e sua propagação, quando o escoamento deslizante turbulento incide sobre um único modelo. Analisando os resultados, identificaram possíveis fontes e mecanismos de difusão das perturbações e a área de influência da esteira, onde os efeitos se dissipam ou poderiam não ser considerados, sem que isto implique introduzir diferenças significativas entre as cargas medidas no túnel e as cargas medidas nas estruturas.

Apresentam-se neste capítulo as referências bibliográficas mais importantes que estudaram minuciosamente as alterações produzidas em um perfil de vento ao deslocar-se sobre um único modelo. Para isto, com prévia caracterização do vento de fundo (vento a barlavento do modelo), avaliam-se as modificações nas propriedades medidas e flutuantes ao passar a sotavento do mesmo. As medições realizadas na esteira verificam que as propriedades turbulentas diferem sensivelmente com respeito às características turbulentas do escoamento de fundo, diminuindo sua intensidade ao aumentar a distância a sotavento do modelo que a provoca.

Peterka et al. (1985) mediram as propriedades do escoamento médio e flutuante na esteira de um modelo exposto a um escoamento deslizante turbulento. Para sotavento, o escoamento requer certa distância de percurso para que os distúrbios introduzidos pelo modelo se dissipem e o vento recupere as características do escoamento de fundo. A extensão de recuperação do escoamento denomina-se região de esteira. Ao comparar as características do comportamento do escoamento, nesta zona, com as propriedades do escoamento de fundo, observa-se uma diminuição da velocidade média, maiores intensidades e menores escalas integrais da turbulência.

A Figura 2.1 mostra como as linhas médias de corrente do escoamento, em torno do modelo de geometria simples, derivam em escoamento de geometria complexa. Antes de chegar ao obstáculo, o escoamento se separa, dependendo da relação altura/largura da construção (h/b), altura do edifício com respeito à altura da camada limite simulada (h/δ) e rugosidade superficial a barlavento do modelo. A turbulência na zona do escoamento separado, combinada com a distribuição de pressões sobre a frente da construção, origina um escoamento vertical descendente à barlavento da construção. O escoamento descendente origina, na zona do escoamento separado, vórtices com tendência a enrolar-se sobre a estrutura e, por convecção, adquirem forma de vórtices de ferradura. O vento vertical descendente e o escoamento próximo dos cantos, na base da mesma, são envolvidos e absorvidos pelos vórtices de ferradura, produzindo velocidades maiores que as contidas no escoamento de fundo. Se considerasse a influência de outros edifícios circundantes, aumentaria a velocidade média nesta região.

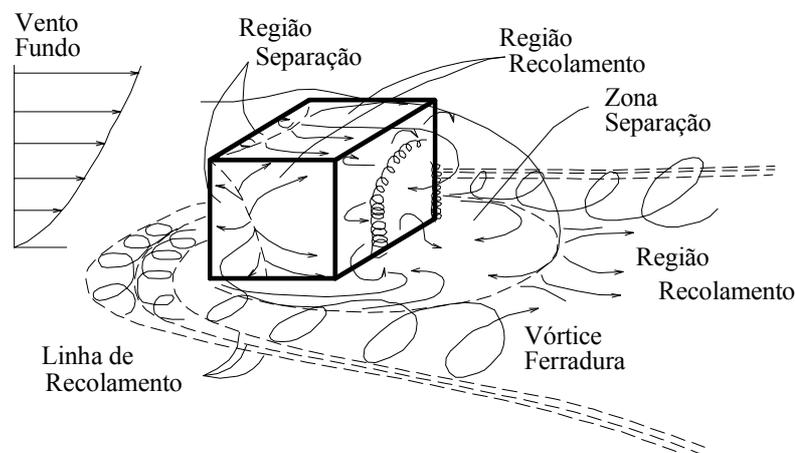


Fig. 2.1: Linha de Corrente em Torno de um Modelo (Peterka et al., 1985).

A Figura 2.2 mostra a distribuição do defeito da velocidade média $\left(\frac{V(z) - \bar{V}}{\bar{V}}\right)$ medida com modelo e sem o mesmo, à mesma altura z sobre o eixo central, para uma relação de $H/\delta = 0,11$, $H/W = 0,4$, $H/D = 3,25$ e $\alpha = 0^\circ$ (direção do vento médio perpendicular à superfície a barlavento) e para diferentes relações X/H a sotavento do modelo, sendo H , W e D a altura, largura e profundidade do modelo respectivamente, δ espessura da camada limite simulada, X distância medida sobre o eixo longitudinal e α a direção do escoamento médio. O defeito de velocidade diminui gradualmente e detectou-se até $X/H \sim 18$ para esta combinação de modelo e escoamento. A altura da esteira aumenta com a distância a sotavento até $3 - 4H$.

A distribuição da componente longitudinal da velocidade média medida em direção horizontal perpendicular à direção do escoamento médio à altura $Z/H = 0,8$ evidencia um aumento da largura da esteira de até $2W$.

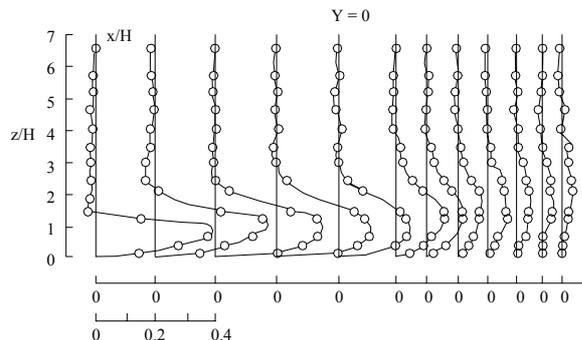


Fig. 2.2: Perfis Verticais de Defeitos de Velocidade Média (Peterka et al., 1985).

Outra característica da esteira é o substancial incremento da turbulência. Na Figura 2.3 apresenta-se a excesso da intensidade da turbulência medida a sotavento do modelo.

O aumento na rugosidade superficial produz, no escoamento, maior intensidade de turbulência, gerando esteiras com características que tendem a desaparecer rapidamente e a diminuir a incidência dos vórtices de ferradura no escoamento a sotavento do modelo. Quando a esteira se gera num terreno de categoria campo aberto, a esteira é detectada a maiores distâncias a sotavento do modelo.

Para fins práticos, a extensão da influência da esteira na área suburbana aumenta quando a relação h/b do modelo diminui. Nos gráficos anteriores, observaram-se como as propriedades médias e flutuantes das velocidades do fluxo de fundo se modificam ao cruzar um modelo e são transportadas pelo fluxo médio a sotavento do mesmo. Os coeficientes de cargas fornecidos pelos códigos de vento obtidos em ensaios no túnel de vento supõem que o escoamento de fundo incida diretamente sobre o modelo em estudo sem considerar as perturbações introduzidas pelas estruturas que constituem o entorno imediato ao modelo principal.

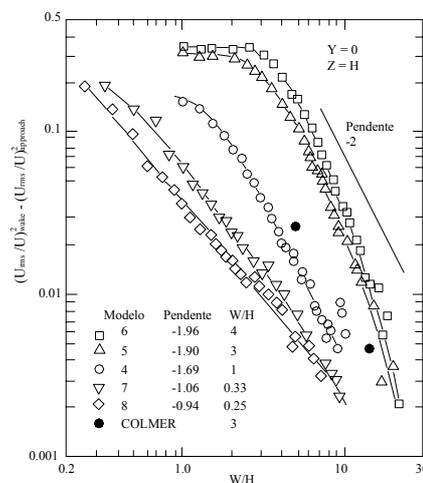


Fig. 2.3: Excesso da Intensidade da Turbulência na Esteira do Modelo (Peterka et al., 1985).

As flutuações das cargas medidas sobre modelos expostos a vento turbulento possuem características similares às do vento incidente. Assim, para que a carga medida em ensaio em túnel de vento sobre um modelo seja confiável, deve-se reproduzir o entorno superficial imediato à estrutura em estudo.

Outra variável a se ter em conta, ao comparar esteiras detrás de um modelo, é a relação entre espessura da camada limite simulada e altura do modelo (δ/h). A maior relação corresponde uma maior profundidade de imersão do modelo na camada limite, em particular na região de produção da turbulência, onde a esteira se difunde com maior rapidez.

Gowda et al. (1997) analisaram a esteira gerada a sotavento de um corpo exposto a um escoamento deslizante turbulento de categoria campo aberto (baixa turbulência), para modelos altos e baixos (diferente relação de imersão δ/h). Em princípio estudaram a modificação do campo de velocidades médias ao introduzir um corpo em forma isolada para duas relações de

$h/b = 1$ e 5 e de seção transversal quadrada (h e b altura e largura do modelo respectivamente). Posteriormente, analisaram o efeito originado ao combinar os elementos, dispondo os modelos em fila, com o corpo de maior relação situado a barlavento do modelo de menor relação (Figura 2.4).

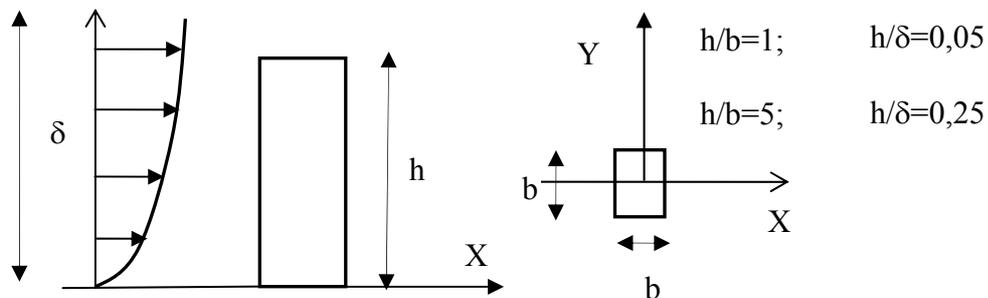


Fig. 2.4: Modelos ensaiados no túnel de vento.

Para o corpo de menor relação h/b com profundidade de imersão na camada limite de $h/\delta = 0,05$ e considerado isolado, mediu-se o campo de velocidades do componente longitudinal da velocidade média V a barlavento e sotavento do mesmo.

Os perfis de velocidades médias a barlavento do corpo não são afetados pelo modelo até $x < -2,7b$. Na direção sotavento do modelo, para $x = 15,37b$ a forma do perfil de velocidades média se recupera totalmente.

As medições da componente vertical de velocidades médias V_v a barlavento do modelo indicam a presença de um componente positivo a barlavento e um valor negativo a sotavento. Isto demonstra que o escoamento diverge do solo em sentido ascendente do corpo e em direção oposta detrás do mesmo. O perfil de velocidade longitudinal é afetado pelo corpo verticalmente até 1,5 vezes a altura do corpo menor.

O modelo com relação de $h/b = 5$ com profundidade de imersão na camada limite de $h/\delta = 0,25$ introduz alterações nas velocidades médias para sotavento até $x \cong 24b$.

Estas medições confirmam que para maior altura do modelo, a área de influência da esteira se estende para sotavento do mesmo.

Posteriormente Gowda et al. (1997) ampliam o estudo à variação dos componentes flutuantes da velocidade do vento. Medem a intensidade da turbulência dos três componentes na esteira de prismas isolados com relação h/b de 1 e 5.

O perfil de intensidade da turbulência não se modifica com respeito ao perfil medido sem modelo até uma distância a barlavento de $x = 2b$ para uma relação do modelo $h/b = 1$. O perfil de intensidade de turbulência se recupera a uma distância a sotavento de $x = 13,7b$.

Ao colocar o modelo de maior relação ($h/b = 5$) o excesso de intensidade da turbulência aumenta. As cargas fornecidas pelos Códigos de Vento consideram as estruturas isoladas. De acordo com estes resultados, seria de se esperar que as cargas médias obtidas ao aplicar o código do vento fossem maiores do que as medidas em ensaios em túnel de vento, enquanto que ocorre o contrário ao comparar as cargas dinâmicas do código e as medidas respectivamente. Para uma correta avaliação das cargas, nos ensaios em túnel de vento, deve-se incorporar o entorno superficial imediato, para que o campo de velocidades possua as características médias e flutuantes que se gerarem em ambiente natural.

Para analisar o campo de velocidades da massa de ar que se desloca sobre dois modelos Gowda et al. (1997), utilizaram os modelos apresentados anteriormente ($h/b = 1$ e 5). Obtiveram-se os perfis de velocidades médias, para o corpo de maior relação, situado em direção barlavento para uma separação variável de $G = 2b, 3b, 4b$, e $8b$ respectivamente, sendo G a distância medida entre os centros geométricos dos modelos (Figura 2.5).

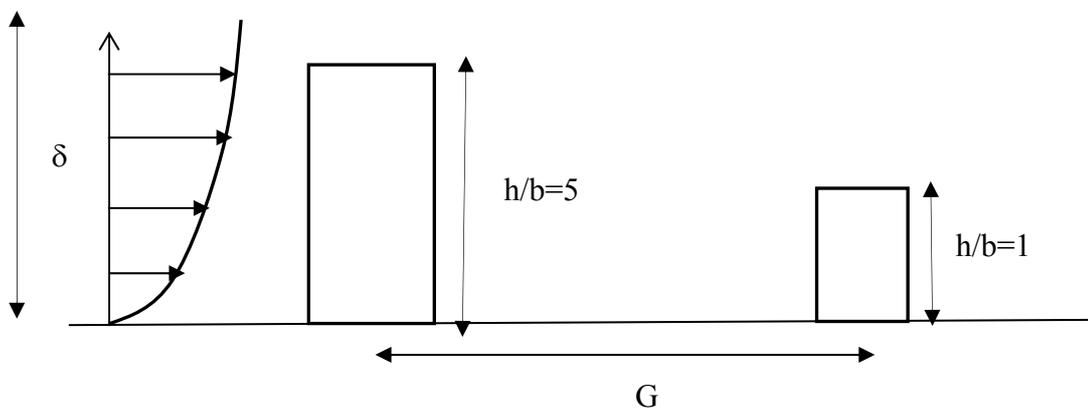


Fig. 2.5: Modelos ensaiados no túnel de vento.

Deduz-se, dos resultados obtidos, que a esteira gerada pelo modelo de maior altura situado a barlavento de outro menor influi até $6b$, sem que as propriedades na esteira se alterem pela presença do modelo de menor altura. O modelo a sotavento e dentro dos limites de $6b$, está exposto a um escoamento de corte turbulento com velocidades médias diferentes ao escoamento de fundo.

Para analisar os efeitos de interferência sobre as propriedades turbulentas, nestas mesmas posições, compararam-se os perfis de intensidade de turbulência entre os modelos e os medidos na esteira do modelo isolado de maior relação h/b . Para uma separação relativa $G/b=8$, o modelo de menor relação h/b não influi na distribuição dos parâmetros turbulentos na esteira do modelo de maior relação. Não obstante que todos os obstáculos gerem perturbações ao escoamento turbulento, os modelos de maior altura governam a distribuição dos parâmetros médios e flutuantes nas esteiras geradas.

Os resultados apresentados confirmam a hipótese de que quando se deseja reproduzir um entorno superficial correspondente a um centro urbano, com edifícios de alturas variáveis, afim de reproduzir um escoamento turbulento a escala similar ao vento atmosférico urbano, é suficiente representar em escala as maiores estruturas existentes no lugar e substituir estruturas com formas geométricas complexas por modelos de formas mais simples, sem que isto implique uma falta de cumprimento às leis de semelhança geométrica.

Com o mesmo critério, Castro (1979) mediu as propriedades médias e instantâneas na esteira gerada a sotavento de um prisma exposto a um escoamento de camada limite categoria suburbana. O prisma com seção quadrada e altura h , situou-se em uma camada limite de espessura δ , com uma relação $h/\delta \ll 1$. Mediram-se perfis de velocidades médias e intensidade da turbulência em diferentes posições a sotavento do prisma para determinar a distância de recuperação do perfil de velocidades médias. A extensão da esteira foi observada pela diminuição das velocidades médias e o incremento da intensidade da turbulência. Para $x/h = 50$, o perfil de velocidades médias se recuperou totalmente, enquanto que a distribuição de tensões de corte apresentou valores maiores até várias vezes a altura do modelo.

Gowda (1980) analisou as variações das velocidades médias e intensidade da turbulência na esteira de um prisma de 80mm de largura, 40 mm de profundidade ($b/d = 2$) e 1000 mm de altura H . O escoamento incidente era turbulento com distribuição de velocidades médias em altura uniforme.

A variação da componente longitudinal de velocidades médias (V) medidas na esteira do prisma ao longo do eixo x paralelo à direção do escoamento médio, estende-se até uma distância transversal $y/H = 1,5$ para uma distância de $x < 5H$, aumentando levemente quando se incrementa x . A maior redução obtém-se ao longo do plano central. Para

$x/H > 10$ ainda se observam perturbações na velocidade média em direção ao escoamento médio. Além disso, mediram-se as três componentes de velocidade flutuante. Conclui-se, dos resultados obtidos, que a área de influência da componente flutuante longitudinal estende-se a sotavento e nas laterais do modelo com alta intensidade. Por último, a componente flutuante vertical adquire baixos valores de intensidade e dissipa-se corrente abaixo do modelo, lentamente. O máximo valor da componente flutuante longitudinal ocorre para $y/H = 1$ (no interior da esteira). Pode-se concluir que as maiores perturbações ao escoamento médio se manifestam sobre o eixo central a sotavento do prisma, estendendo-se transversalmente até uma distância maior que a largura do prisma.

A fim de verificar se a área de influência da esteira provocada por estruturas baixas é diferente das geradas em estruturas altas, menciona-se o trabalho realizado por Peterka e Cermak (1975), que realizaram medições do campo de velocidades na esteira de prismas baixos, com relações de altura/largura ($H/W \cong 0,5$) e altura/profundidade ($H/D \cong 1$), expostos à escoamento de corte turbulento de terreno categoria suburbana ($\varphi = 0,24$) normal à superfície. Para determinar a área de influência da esteira, mediram a velocidade do escoamento com e sem modelo. Obtiveram-se perfis de defeito de velocidades médias de $X/H = 0,5$ até $18H$. A extensão vertical da esteira é de $1,5H$ perto do modelo e 4 a $5H$ para uma distância a sotavento de $18H$. O excesso de intensidade da turbulência longitudinal em correspondência aos anteriores perfis se recupera a uma distância de 10 a $12H$ (Figura 2.6).

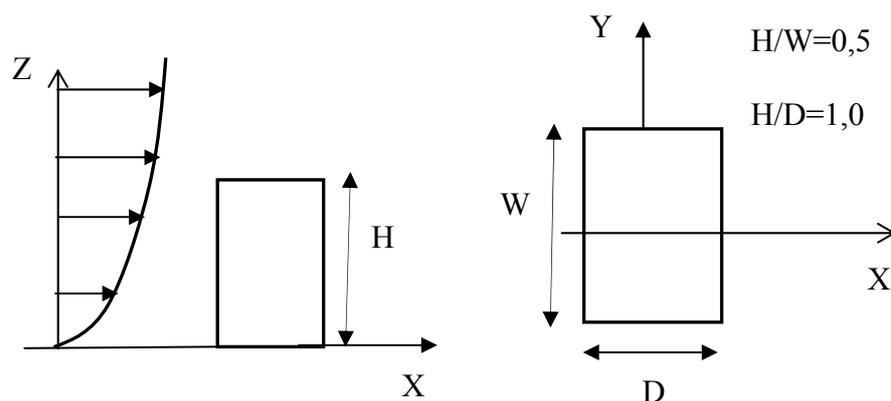


Fig. 2.6: Modelos ensaiados no túnel de vento.

Perfis do defeito do componente longitudinal da velocidade média e intensidade da turbulência medidos em direção horizontal transversal ao escoamento médio fornecem informação adicional para entender a estrutura do fluxo na esteira de um corpo. Mediram-se

os perfis a uma altura de $Z = 0,8H$, para X/H variando de 0,5 a 18. Nas cercanias do modelo, a máxima variação não ocorre sobre a linha central, mas ela está deslocada de 0,5 a 1 de largura da construção (W). As correlações de velocidades na esteira fornecem informação útil sobre o tamanho dos redemoinhos e infere-se dos valores obtidos que as escalas da turbulência do escoamento sem perturbação são maiores que as medidas na esteira do modelo que agrega turbulência a escalas menores. Como na esteira a turbulência é abastecida pelas perturbações introduzidas no escoamento pela construção, poder-se-ia antecipar que a escala integral da turbulência assumirá valores próximos à dimensão característica da construção. A área de influência da esteira de um modelo tridimensional em direção vertical estende-se 4 ou 5 vezes a altura da construção e em direção lateral 4 ou 5 vezes a largura da mesma. Conclui-se que os modelos baixos introduzem perturbações no escoamento (esteira) até $18H$ a sotavento do modelo, extensão menor que as obtidas para estruturas altas. As cargas originadas pelo vento sobre as construções dependem da configuração do escoamento que se desloca sobre a rugosidade superficial. Para que a carga obtida em ensaios em túnel de vento possa ser aplicada a protótipos é necessário que o vento médio e as características turbulentas do escoamento nas proximidades do modelo sejam as mesmas que na escala natural.

3. MODELAGEM FÍSICO DE AMBIENTE URBANO

3.1 MODELAGEM FÍSICO EM TÚNEL DE VENTO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL

No interior da camada limite atmosférica o vento é turbulento. As cargas produzidas sobre construções são influenciadas pelos parâmetros que caracterizam o escoamento. Os campos de velocidade média e flutuante são modificados pela disposição de rugosidades próximas da estrutura. Para obter as cargas corretas em modelos reduzidos em ensaios em túnel de vento, é preciso que as características do vento da escala natural se reproduzam adequadamente no túnel de vento.

Plate (1999) descreve os fundamentos da modelagem físico de entornos superficiais em túnel de vento e expõe, ordenada e sistematicamente, as bases conceituais que fundamentam os critérios que devem ser utilizados quando definirmos o modelo físico em função do tipo de estudo que vai ser feito em túnel de vento. Concebe o túnel de vento de camada limite como a ferramenta fundamental no desenvolvimento da Engenharia de Vento, considerando que o escoamento de ar sobre o piso do túnel, gera uma camada limite a escala, com estrutura turbulenta semelhante ao escoamento atmosférico sob condições de estratificação neutra.

Os problemas práticos gerados por condições atmosféricas urbanas se estudam em túnel de vento. Introduzem-se modelos físicos que reproduzem o entorno superficial urbano e mantêm a similitude geométrica em escala conveniente com a finalidade de gerar um campo de velocidades em túnel de vento semelhante àquele medido na escala natural. Para reproduzir entorno superficial mantendo a similitude geométrica nas formas, os modelos físicos são mais confiáveis para recriar, em escala reduzida, as condições reais de escoamento. É preciso analisar se o campo de escoamento obtido representa um modelo reduzido de um escoamento atmosférico real.

Plate limita a resposta e indica que existe uma clara evidência experimental, que se a análise se refere à análise de cargas sobre estruturas, a comparação dos resultados no modelo e protótipo, predizem o comportamento de maneira confiável. Isto se deve ao fato que forças e pressões superficiais dependem do escoamento médio e da turbulência do vento atmosférico.

A turbulência deriva da interação de vórtices com as construções e desenvolve-se na esteira dos obstáculos. Os modelos se constroem na escala geométrica em relação às dimensões do túnel e às características do escoamento (modelo físico), situam-se imitando a disposição do entorno superficial do ambiente natural, conseguem assim que a estrutura turbulenta do escoamento em túnel seja semelhante ao vento atmosférico no mesmo ambiente.

As velocidades máximas de vento provocam as forças utilizadas no projeto de estruturas, assim sendo, os ensaios se realizam nas máximas velocidades de escoamento o que permite verificar os altos números de Reynolds como condição da modelagem. Esquemáticamente, a simulação do entorno superficial urbano se mostra na Figura 3.1.

A Figura 3.1 distingue as regiões compreendidas no processo de simulação do ambiente urbano: Simulação do escoamento de fundo e Simulação do escoamento urbano.

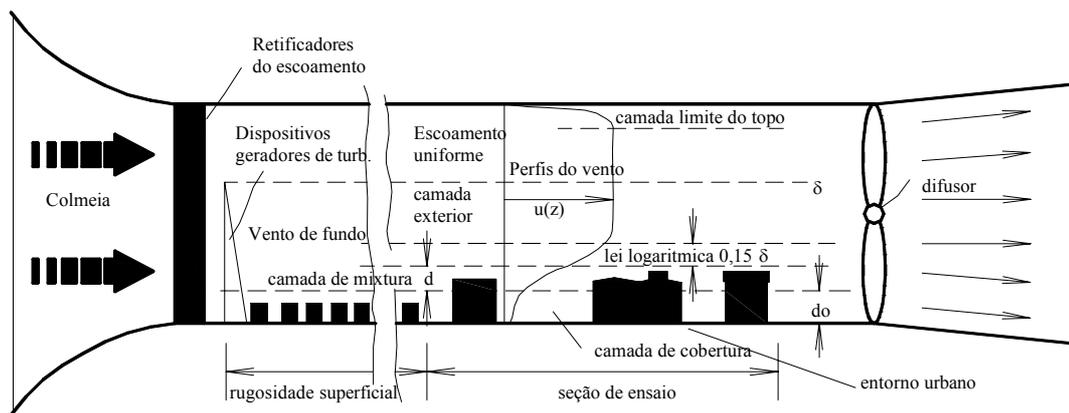


Fig. 3.1: Equipamento de simulação do ambiente urbano (Plate, 1999)

Para modelar convenientemente a camada superficial rugosa precisa-se que a relação $E_G = \frac{z_m}{z_p}$ seja em escala, sendo z_m e z_p a altura do modelo e protótipo. Em áreas urbanas se trabalha com escalas geométricas de 1/100 até 1/1000, o que permite modelar adequadamente a geometria relevante desde um ponto de vista aerodinâmico.

O procedimento para provocar escoamento de camada limite urbana em túnel de vento, semelhante ao vento atmosférico urbano, consiste em escolher o contorno de velocidades médias conforme a Equação 2.4 que representa o escoamento médio de fundo, introduzindo logo obstáculos superficiais que constituem o entorno superficial imediato.

Os modelos modificam a estrutura média e turbulenta do escoamento de fundo e geram, na massa de ar, a distribuição do campo de velocidades médias e flutuantes, semelhante ao vento atmosférico.

Os coeficientes aerodinâmicos aconselhados pelas normas sobre cargas de vento, baseiam-se em ensaios em túnel de vento com modelos isolados e sujeitos à ação do vento escoando sobre uma superfície rugosa homogênea. Nas normas ou recomendações se aceita, conseqüentemente, turbulência homogênea sem ter em conta a interação entre edifícios nem a influência de edifícios próximos.

Neste trabalho apresenta-se uma metodologia para reproduzir o entorno superficial em ambientes centrais de grandes cidades, considerando a natureza aleatória das dimensões e a separação das construções que permite simular campos ou processos aleatórios, neste caso o entorno h acima o prédio, definido como um campo aleatório bi-dimensional, em termos da sua densidade de probabilidade e da sua densidade espectral. Tendo em conta que, geralmente, as construções altas em ambientes urbanos são de corte transversal retangular, as estruturas modelaram-se na forma de prismas definidos por três variáveis aleatórias correlacionadas (altura, largura, profundidade), além da separação, que depende, pela sua vez do número de construções por unidades de área. Dados estatísticos iniciais, necessários para a implementação do método (médias estatísticas, desvios padrão e correlações), obtiveram-se da análise de alturas e dimensões em plantas de edifícios construídos em oito quadras na cidade de Buenos Aires (Argentina).

Embora os estudos indicados possam oferecer grande utilidade em outras áreas, por exemplo, no uso do espaço urbano, planejamento urbano, absorção e emissão de calor em zonas urbanas, o doutorando não encontrou na literatura técnica, nenhuma referência nem antecedentes sobre o tema.

3.2 IMPORTÂNCIA DA REPRODUÇÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL EM ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO

O método de Cook-Mayne (1979) utiliza-se em alguns códigos para determinar a carga provocada pelo vento. Harris (1982) fundamenta esse método na adoção de uma relação funcional entre carga e velocidade do vento do tipo:

$$F_i(t) = \frac{1}{2} \times \rho \times A_i \times C_i(t) \times [V(z)]^2 \quad (3.1)$$

Na qual $F_i(t)$ representa a variação da carga provocada pelas flutuações da velocidade do vento, ρ a massa específica do ar, A_i uma área de referência, $C_i(t)$ um coeficiente de pressão aerodinâmica variável com o tempo e $V(z)$ a velocidade média horária à altura z .

A carga provocada pelo vento, definida desta maneira, acrescenta as variações da velocidade do vento da região macro meteorológica, por meio de $V(z)$, que em (3.1) aparece já como constante, isto quer dizer que não depende do tempo. As flutuações de velocidade de vento correspondentes à região micro meteorológica do espectro são ponderadas conjuntamente com as características aerodinâmicas da construção nas variações instantâneas de $C_i(t)$. Assim sendo, como essas flutuações, em escala natural, são provocadas pela interação da massa do fluido com o entorno superficial da estrutura, resulta conseqüentemente necessário reproduzir no túnel, o entorno superficial imediato da estrutura que está sendo estudada.

3.3 ESTUDO ESTATÍSTICO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DO CENTRO DA CIDADE DE BUENOS AIRES.

Dados estatísticos iniciais necessários para a implementação do modelo (médias, variâncias e correlação) obtiveram-se da análise de alturas e dimensões em planta de edifícios construídos em oito quarteirões no centro da cidade de Buenos Aires (Argentina). Para determinar a função de densidade e distribuição de probabilidade das variáveis, previamente foram construídos histogramas dos edifícios analisados, aos que se ajustaram logo os modelos propostos.

Assim sendo, solicitaram-se à Empresa Geoshark os planos em planta com alturas médias dos edifícios construídos na cidade de Buenos Aires, obtidos através do processamento das fotos aéreas. Estas informações conferem a validade da hipótese inicial de que as estruturas são prismas retangulares.

Os histogramas sugerem claramente um modelo exponencial, com funções de densidade e distribuição de probabilidade dados pelas (3.2) e (3.3):

$$f(z_i) = p \times \exp[-p \times (z_i - z_a)] \quad z_i - z_a \geq 0 \quad (3.2)$$

$$F(z_i) = 1 - \exp[-p \times (z_i - z_a)] \quad z_i - z_a \geq 0 \quad (3.3)$$

nas quais p é inversa do desvio padrão e $z_a = E(z_i) - p$.

Nas Tabelas 3.1 e 3.2 se mostram os valores estatísticos das variáveis obtidas do relevamento da informação gráfica e os parâmetros de ajuste que definem as funções de probabilidade das variáveis aleatórias.

Tabela 3.1: Valores médios, desvio padrão e correlações das variáveis obtidas nos quarteirões de Buenos Aires.

	Média (m)	Desvio Padrão (m)	Coeficientes de correlação		
			Largura b_1	Profundidade b_2	Altura h
Largura b_1	13.6	9.8	1.0	0.4	0.1
Profundidade b_2	23.2	9.7	0.4	1.0	0.05
Altura h	24.7	17.5	0.1	0.05	1.0

Tabela 3.2: Parâmetros de ajuste.

	Largura b_1	Profundidade b_2	Altura h
$E[z_0]$	3,8	13,4	7,24
$E[p_2]$	1,28	0,34	0,35

Nas Figuras 3.2, 3.3, e 3.4 apresentam-se gráficos das funções densidade das variáveis aleatórias largura, profundidade e altura superpostas a valores obtidos dos histogramas respectivos.

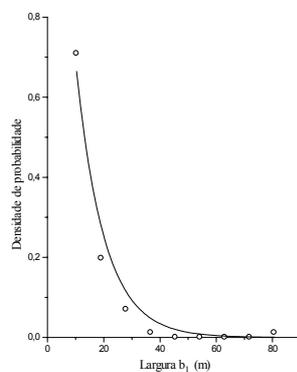


Fig. 3.2: Densidade de probabilidade da largura b_1

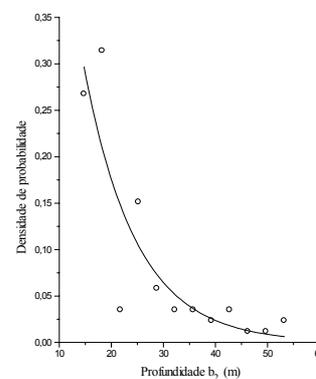


Fig. 3.3: Densidade de probabilidade da profundidade b_2

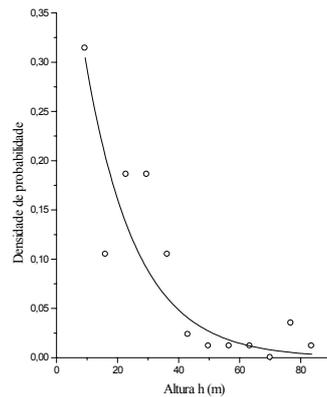


Fig. 3.4 Densidade de probabilidade da altura h

Observa-se que a densidade de probabilidade exponencial ajusta satisfatoriamente aos valores medidos na zona do centro da cidade de Buenos Aires.

3.4 MÉTODO DE SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

O método de simulação de Monte Carlo consiste na geração de amostras de uma variável aleatória a partir da sua função de distribuição de probabilidades. Se o fenômeno depende de uma variável aleatória, só precisa gerarem-se amostras com densidades de probabilidade uniforme, distribuídas entre 0 e a unidade (não correlacionadas). Com esses valores substituídos no inverso da função de distribuição da variável por simular, geram-se valores descritos estatisticamente pela função de distribuição adotada.

Este procedimento é válido quando se deve reproduzir uma variável ou variáveis aleatórias independentes. Se considerarmos que normalmente as construções altas têm seção transversal retangular, as estruturas situadas em centros urbanos a simular, se assemelhariam a prismas retangulares. Assim sendo, um modelo que constituísse o entorno ficaria definido pelas três variáveis aleatórias (largura, altura e profundidade) e a correlação entre elas.

A informação estatística das variáveis aleatórias que definem o processo limita-se normalmente à média, desvio padrão, distribuição de probabilidade marginal e coeficientes de correlação. Por isso é conveniente adotar um método de simulação que utilize as distribuições de probabilidades marginais e não a função de distribuição conjunta.

Para gerar variáveis aleatórias correlacionadas, em espaço tridimensional, que definam o evento “entorno superficial urbano” seguiram-se as seguintes etapas:

(a). Geram-se variáveis Gaussianas Standard (Z_i), através da técnica de transformação inversa, obtendo o resultado $Z_i(r_i) = \theta^{-1}[(r_i)]$, que transforma uma variável aleatória r_i , caracterizada por uma função de densidade uniforme com média zero e desvio padrão unitário, em uma variável Gaussiana standard não correlacionada (Z_i), com $\theta^{-1}()$ como a função inversa da função de distribuição Gaussiana standard unidimensional.

(b). Devido a que as variáveis aleatórias no espaço original são não Gaussianas correlacionadas, para aplicar Monte Carlo utiliza-se o Modelo de Nataf, que permite obter a função de distribuição conjunta original, por meio do produto das funções de densidades marginais do espaço original multiplicadas por um fator de correção (Pei-Ling Liu y Der Kiureghian, 1986). O fator de correção é constituído pelo quociente entre a função de densidade de probabilidade conjunta correlacionada no espaço Gaussiano e o produto das funções marginais no espaço Gaussiano:

$$p_X(\bar{x}) = \left[\prod_{i=1}^n p_{X_i}(x_i) \right] \frac{\phi[\bar{z}(\bar{x}), R_Z]}{\prod_{i=1}^n \theta[z_i(x_i)]} \quad (3.4)$$

Através da (3.4), o problema se resolveria, mas a função $\phi[\bar{z}(\bar{x}), R_Z]$ exige que os valores de $\bar{z}(\bar{x})$ sejam correspondentes com um espaço Gaussiano correlacionado, sendo:

$$\phi(\bar{z}, R_z) = \left[(2\pi)^n \det R_z \right]^{\frac{1}{2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (L_z^{-1} \bar{z})^T (L_z^{-1} \bar{z}) \right\} \quad (3.5)$$

O problema reduz-se, agora a determinar R_Z calculado como:

$$R_Z = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{z,12} & \dots & \rho_{z,1n} \\ \rho_{z,21} & 1 & \dots & \rho_{z,2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{z,n1} & \rho_{z,n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} = L_Z L_Z^T \quad (3.6)$$

A vantagem do método consiste em que os fatores de correlação normalizados no espaço Gaussiano $\rho_{z,ij}$ são obtidos em função do fator de correlação normalizado no espaço original através da solução fechada dada por:

$$\rho_{ij} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{x_i(z_i) - \mu_i}{\sigma_i} \right) \left(\frac{x_j(z_j) - \mu_j}{\sigma_j} \right) \phi(z_i, z_j, \rho_{z,ij}) dz_i dz_j \quad (3.7)$$

O coeficiente R_Z permite passar do espaço original correlacionado ao espaço Gaussiano, considerando a influência da correlação no novo espaço. Os coeficientes de correlação $\rho_{z,ij}$ obtêm-se através da expressão anterior aplicando um processo iterativo. Para determinar os coeficientes $\rho_{z,ij}$ é necessário calcular $\phi(z_i, z_j, \rho_{z,ij})$:

$$\phi(z_i, z_j, \rho_{z,ij}) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_{z,ij}^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2(1-\rho_{z,ij}^2)}(z_i^2 - 2\rho_{z,ij}z_i z_j + z_j^2)\right\} \quad (3.8)$$

O processo iterativo parte da geração de valores distribuídos uniformemente, adotando um dz entre um intervalo $+z/z$. Com os valores gerados, obtêm-se os $x_i(z_i)$, por meio da expressão $x_i(z_i) = P_{Xi}^{-1}[\theta(z_i)]$, sendo $\theta()$ a função de distribuição em um espaço gaussiano normalizado e P_X a função de distribuição no espaço original. Para obter os $\rho_{z,ij}$ deve-se resolver a igualdade da Equação 3.8.

(c) Geram-se valores z pertencentes a um espaço gaussiano normalizado não correlacionado. A quantidade de valores z gerados, dependerá das dimensões do espaço do vento desejado (neste caso são três: base, profundidade e altura). Com os coeficientes de correlação no espaço gaussiano ρ_z , obtido no passo anterior, determinam-se os coeficientes de fatorização de Cholesky (L), os quais, através da retro-substituição permitem transformar as variáveis z , recentemente geradas em um espaço gaussiano não correlacionado a um espaço gaussiano não normalizado correlacionado (Z).

Finalmente, com os valores Z obtidos desta maneira, substituídos na inversa da função de distribuição marginal do espaço original $\bar{x}_i(z_i) = P_{Xi}^{-1}[\theta(z_i, \rho_{zi})]$, obtêm-se as variáveis que respondem à função de distribuição adotada, sem modificar as características estatísticas do espaço original.

O entorno superficial gerado caracteriza-se pelas propriedades estatísticas obtidas através do processamento de dados de construções reais de uma cidade que responde às características de terreno de categoria urbano, definido nos códigos de vento.

3.5 REPRODUÇÃO DO ENTORNO POR MEIO DO MÉTODO MONTE CARLO.

Para gerar o entorno próximo à estrutura em estudo utilizou-se a linguagem de programação Matlab. Uma limitação deste programa é que as estruturas constitutivas do entorno urbano situam-se em quadras regulares de dimensões constantes de 100m*100m e que todas as estruturas constroem-se sobre a frente das quadras.

Com as dimensões geométricas da estrutura simulada (largura, profundidade e altura) geram-se, em forma aleatória, as coordenadas de situação da estrutura no plano da quadra respectiva (X_e, Y_e).

Antes de situar a estrutura simulada, realiza-se a divisão do domínio da quadra em quatro frentes (I, II, III e IV). Com as coordenadas, situa-se a estrutura e identifica-se a frente a ter em conta. Na Figura 3.5, a coordenada que define a situação da estrutura é X_e sobre frente III.

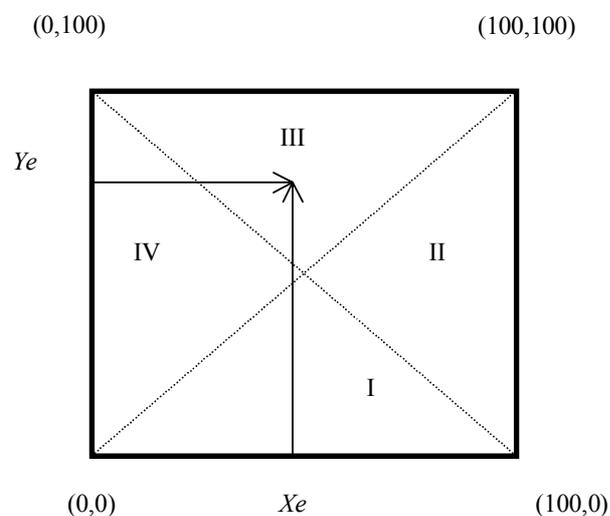


Fig. 3.5: Situação da estrutura no quarteirão do entorno rugoso

Uma vez situada a estrutura, e com as dimensões geométricas geradas na forma aleatória que a define, verifica-se que ela disponha do espaço físico necessário para a sua construção. Assim sendo:

1.1 Se a estrutura a construir é a primeira estrutura próxima aos limites superiores ou inferiores da quadra, verifica-se que as dimensões não ultrapassem os limites de comprimento da quadra e que o lado oposto não se superponha com outra estrutura.

1.2 Se a estrutura se situa entre duas estruturas construídas, verifica-se que os limites dos lados da construção não ocupem as estruturas situadas aos lados.

1.3 Uma vez a estrutura situada na sua frente respectiva, verifica-se que os lados não se interceptem pela profundidade de construções nas frentes laterais, imediatamente inferior e superior.

1.4 Finalmente, verifica-se que a profundidade da estrutura simulada não se superponha com o fundo das estruturas construídas na frente oposta.

O programa gerará estruturas até que a soma das frentes dos edifícios não ultrapasse um valor limite determinado nesse programa (%400).

Na Figura 3.6, observam-se modelos reduzidos simulados numericamente com o programa de simulação correspondente.

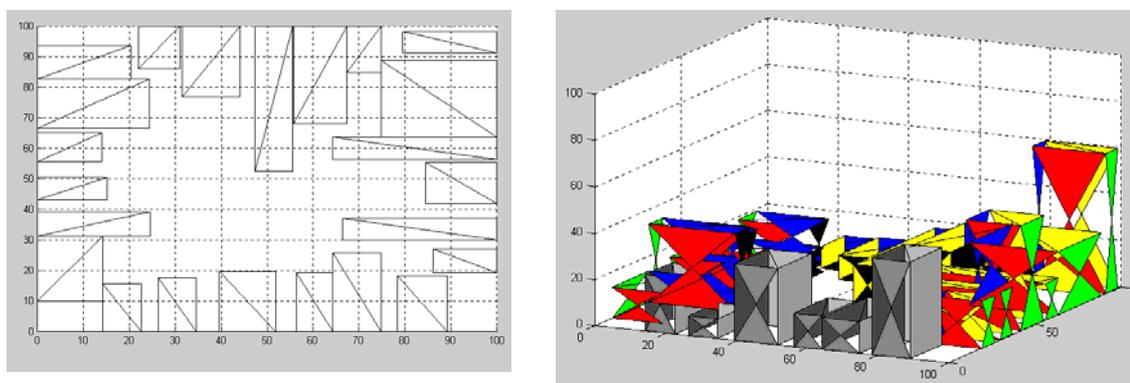


Fig. 3.6: Modelos reduzidos simulados numericamente

Na tabela 3.3 apresentam-se valores estatísticos das variáveis obtidas com a primeira simulação de eventos aleatórios de edifícios correspondentes ao entorno aleatório. As desviações atribuem-se a erros estatísticos.

Tabela 3.3: Valores médios, desvio padrão e correlações das variáveis obtidas pelos modelos gerados numericamente em um quarteirão.

	Média (m)	Desvio Padrão (m)	Coeficientes correlação		
			Largura b_1	Profundidade b_2	Altura h
Largura b_1	10,1	4,8	1,00	0,06	0,02
Profundidade b_2	19,8	5,7	0,06	1,00	0,02
Altura h	22,8	12	0,02	0,02	1,00

Na Figura 3.7 observam-se 26 simulações do entorno urbano da cidade de Buenos Aires (Argentina), construídas em escala de simulação 1/300, para realizar ensaios estruturais em túnel de vento e considerando a influência do entorno imediato à estrutura em estudo.

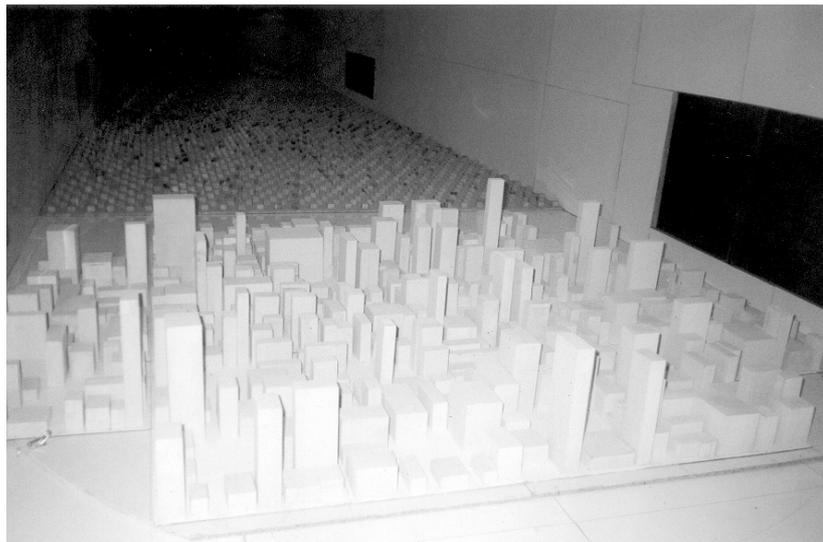


Fig. 3.7: 26 quarteirões de entorno urbano da cidade de Buenos Aires (Argentina), construído em escala de simulação 1/300

Apresentou-se uma metodologia para reproduzir o entorno de construções submetidas à ação do vento em um ambiente urbano, característico do centro de grandes cidades, tendo em conta a natureza aleatória das dimensões e a separação das construções por meio da técnica Monte Carlo e o modelo de Nataf. Essa técnica permitiu reproduzir as construções altas em ambientes urbanos de seção transversal retangular, definindo-as por três variáveis aleatórias correlacionadas (altura, largura e profundidade), além da separação, que depende do número de construções por unidade de área.

Os resultados obtidos com a aplicação desta metodologia, para recriar as condições de entornos superficiais através da reprodução de modelos em escala reduzida, para ensaios estruturais em túnel de vento, foram satisfatórios.

3.6 MODELOS FÍSICOS DE AMBIENTE URBANO GERADOS ALEATÓRIAMENTE.

Foram construídos seis modelos físicos de ambientes urbanos da cidade de Buenos Aires-Argentina.

Para analisar a influência da densidade em planta de rugosidades superficiais na caracterização do perfil de vento, realizaram-se três modelos físicos de ambientes urbanos aleatórios com densidade em planta reduzida à metade do modelo real.

Os modelos físicos relativos a ambientes urbanos densamente povoados construíam-se da seguinte forma:

1. As dimensões da câmara de ensaio do túnel de vento da U.N.N.E. permitem situar 26 quadras em escala geométrica de 1/300.
2. Assim sendo, cada modelo físico está formado por 26 quadras.
3. O programa executa-se até completar a densidade em planta de cada uma das quadras.
4. Uma vez definidas a dimensão e a posição da cada um dos modelos nas 26 quadras, construiu-se em escala, o modelo físico representativo do ambiente urbano desejado.
5. Foram construídos dois modelos completos. Para isso, executou-se o programa 52 vezes, gerando dois modelos físicos de 26 quadras respectivamente. A cada uma das quadras, deu-lhe-se um número de 1 a 26.
6. Para realizar o modelo físico respectivo, indicou-se, no piso do túnel, a situação dos 26 quarteirões, com um número em ordem ascendente. Depois, para cada posição indicada, se tirou a sorte o quarteirão pertinente, até completar o modelo físico. Uma vez determinadas as coordenadas de situação, para fixá-las ao piso do túnel, deve ser sorteada a frente (I, II, III ou IV), a qual se situará a barlavento da câmara de ensaio, ficando definida a situação de cada

quarteirão por combinação de duas variáveis aleatórias: situação e posicionamento das frentes respectivas.

7. Aplicaram-se a mesma metodologia com os outros quarteirões até completar o segundo modelo físico aleatório.

8. O terceiro modelo constitui-se pelos 13 quarteirões correspondentes ao primeiro modelo físico e os 13 restantes do segundo respectivamente. A escolha de 13 quarteirões para cada modelo realizou-se aleatoriamente, sorteando-os até completar 13 entre os 26 disponíveis de cada modelo físico realizado. Logo, situou-se no piso do túnel conforme o processo realizado com anterioridade.

Para construir os três modelos físicos correspondentes a ambiente urbano mais ou menos povoado, o programa de geração de modelos aleatórios situados em todos os quarteirões foi modificado. Utilizou-se, como limite de densidade superficial, a metade daquela que corresponde ao ambiente urbano real (Quilmes).

O programa executou-se 26 vezes, gerando os 26 quarteirões respectivos. Com eles, foram construídos três modelos físicos, com 26 quarteirões cada um, os que ficaram definidos com sorteios aleatórios da posição no piso do túnel e definição aleatória das frentes respectivas.

Dessa maneira, as diferenças entre cada um dos modelos físicos, obtiveram-se por diferentes posições no piso do túnel e localização das frentes, como resultado dos sorteios realizados em cada um dos modelos físicos respectivos.

A disposição dos modelos físicos, no interior da câmara de ensaios, deve permitir o giro da mesa de ensaio, com a finalidade de medir as cargas provocadas pelo vento em diferentes direções do escoamento médio incidente. Na Figura 3.8 se mostra a localização de cada quarteirão no interior da câmara de ensaio, com sua posição no piso do túnel.

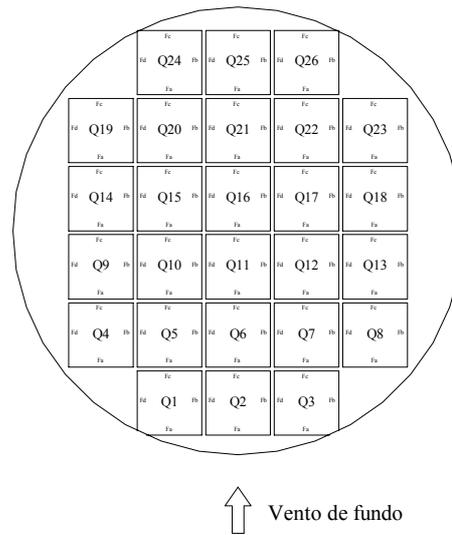


Fig. 3.8: Localização dos quarteirões na câmara de ensaio

No Relatório Técnico 1 (De Bortoli, 2005), apresentam-se os dois modelos físicos completos que reproduzem o centro urbano com igual densidade superficial. Especifica-se cada quarteirão simulado, com a sua frente respectiva, as dimensões dos modelos que o compõem, distribuídos por frentes até completar a densidade superficial exigida (Modelos 1 e 2).

Ademais, no Relatório Técnico 1 (De Bortoli, 2005) se inclui o modelo físico completo que reproduz o centro urbano com metade de densidade superficial, mantendo as características estatísticas. Especifica-se cada quarteirão simulado, com a sua frente respectiva, as dimensões dos modelos que o compõem, distribuídos por frentes até completar a densidade superficial exigida (Modelo 3).

Com os modelos obtidos, foram construídos os seis modelos físicos utilizados neste trabalho. Nas Tabelas 3.4 e 3.5 se resume a composição dos modelos físicos, para cada posição identifica-se o número de modelo físico (M), quarteirão situado (Q) e a frente colocada a barlavento da câmara de ensaio (F), ficando os frentes automaticamente definidos.

Tabela 3.4: Modelo Físico urbano S1-S2-S3

P	Modelo Físico S1			Modelo Físico S2			Modelo Físico S3		
	M	Q	F	M	Q	F	M	Q	F
1	1	4	2	1	4	2	2	26	2
2	1	23	4	2	6	3	2	6	2
3	1	8	1	1	8	1	2	16	2
4	1	17	1	2	17	1	2	9	2
5	1	22	2	2	22	2	2	2	1
6	1	6	2	2	6	2	2	7	4
7	1	26	4	1	26	4	2	20	1
8	1	21	3	2	21	3	2	3	1
9	1	20	3	2	20	3	2	5	2
10	1	1	2	2	1	2	2	12	3
11	1	18	3	1	18	3	2	22	3
12	1	10	1	2	10	1	2	1	4
13	1	24	1	1	24	1	2	15	4
14	1	14	4	2	14	4	2	8	1
15	1	25	4	2	25	4	2	10	2
16	1	19	1	1	19	1	2	17	3
17	1	13	1	1	13	1	2	23	3
18	1	16	1	1	16	1	2	21	4
19	1	2	3	1	2	3	2	19	4
20	1	15	2	1	15	2	2	24	4
21	1	12	3	2	12	3	2	14	4
22	1	5	2	2	5	2	2	11	3
23	1	9	3	2	9	3	2	13	4
24	1	3	1	1	3	1	2	25	3
25	1	7	4	2	7	4	2	4	1
26	1	11	2	1	11	2	2	18	2

Tabela 3.5: Modelo Físico urbano S4-S5-S6

P	Modelo Físico S4			Modelo Físico S5			Modelo Físico S6		
	M	Q	F	M	Q	F	M	Q	F
1	3	4	2	3	4	2	3	4	2
2	3	23	4	3	1	2	3	10	2
3	3	8	1	3	8	1	3	8	1
4	3	17	1	3	14	1	3	23	4
5	3	22	2	3	25	3	3	13	3
6	3	6	2	3	15	2	3	14	3
7	3	26	4	3	23	4	3	17	4
8	3	21	3	3	12	1	3	9	4
9	3	20	3	3	9	1	3	11	4
10	3	1	2	3	16	2	3	25	2
11	3	18	3	3	18	3	3	18	3
12	3	10	1	3	20	2	3	7	1
13	3	24	1	3	21	1	3	20	1
14	3	14	4	3	11	3	3	2	1
15	3	25	4	3	22	1	3	12	1
16	3	19	1	3	19	1	3	19	1
17	3	13	1	3	10	1	3	16	2
18	3	16	1	3	6	3	3	21	2
19	3	2	3	3	5	2	3	24	4
20	3	15	2	3	3	2	3	26	1
21	3	12	3	3	7	4	3	5	2
22	3	5	2	3	26	3	3	15	1
23	3	9	3	3	24	4	3	3	3
24	3	3	1	3	13	4	3	6	3
25	3	7	4	3	2	3	3	1	4
26	3	11	2	3	17	3	3	22	2

4. DETERMINAÇÃO DAS CARGAS SOBRE UM MODELO E SUA RELAÇÃO COM O VENTO INCIDENTE

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo realiza-se uma recompilação de trabalhos que analisam as diferenças entre as cargas provocadas pelo vento atuando em uma estrutura isolada e com a presença de outras estruturas. Com esta finalidade, realizou-se uma amplo recompilação de trabalhos que mostram como a resposta de uma construção exposta a um escoamento turbulento, apresenta indícios da estrutura turbulenta do vento incidente.

4.2 RELAÇÃO DAS FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO E AS VELOCIDADES FLUTUANTES DO ESCOAMENTO

Ruschewey (1979, 1998) descreve as variações nas cargas medidas em uma estrutura situada na esteira do modelo e resume os principais trabalhos que determinaram efeitos de interação entre o modelo em pesquisa e a influência de um modelo situado em seu entorno.

Menciona os ensaios realizados por Whitbread (1972, apud Ruschewey, 1998) que demonstrou que as cargas estáticas medidas nas Quantas Centre Towers em Sydney, se incrementam os esforços até 20% provocados pela interação do escoamento com as duas torres. Melbourne (1975, apud Ruschewey, 1998) observou que a resposta dinâmica de uma construção alta situada na esteira de um modelo incrementa até 100% e o momento de flexão na base até 40%. Blessmann e Riera (1980, apud Ruschewey, 1998) investigaram a interação entre dois prismas quadrados, concluindo que o momento de torção incrementa mais de três vezes com respeito ao valor medido considerando o modelo isolado.

Idêntico resultado observou Ruschewey (1998) na resposta dinâmica da vibração à torção do modelo situado a sotavento. Saunders e Melbourne (1980, apud Ruschewey, 1998) analisaram o efeito das rajadas sobre uma construção de 150m de altura com um edifício a barlavento, concluindo que se as construções têm as mesmas dimensões a principal incrementa as cargas dinâmicas.

Na Figura 4.1 observa-se a variação dos espectros do componente flutuante longitudinal da velocidade a distintas distâncias do modelo de referência. Consegue-se uma ótima compreensão, normalizando os espectros com respeito à curva 1 (modelo isolado).

A curva 1 representa o espectro do componente flutuante do escoamento a uma distância $a = 3,83H$ ($H =$ altura do modelo) a barlavento do modelo de referência e descreve a turbulência do escoamento sem as perturbações introduzidas pelo modelo. A intensidade da turbulência diminui (curva 2 e 3), perto do modelo, devido ao efeito de aceleração do escoamento médio. Nos lados da construção, a separação do escoamento se manifesta com picos no espectro de velocidades (curvas 4 e 5).

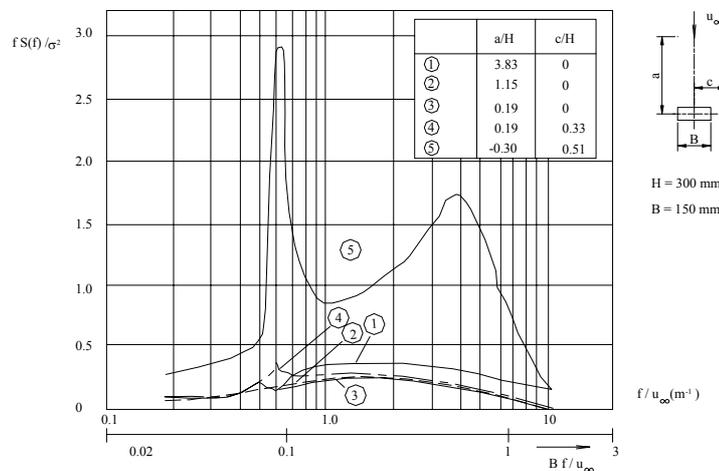


Fig. 4.1: Espectro da turbulência do escoamento turbulento a barlavento e lateral do modelo (Ruschewey, 1998)

Na Figura 4.2 mostram-se os espectros das pressões flutuantes medidas a barlavento do modelo principal situado na esteira do modelo e na Figura 4.3 com o modelo isolado respectivamente. Neste último, o espectro de pressões é semelhante ao da turbulência do escoamento de fundo, mas ao situar um modelo a barlavento, observam-se picos de energia que estavam ausentes na turbulência isotrópica.

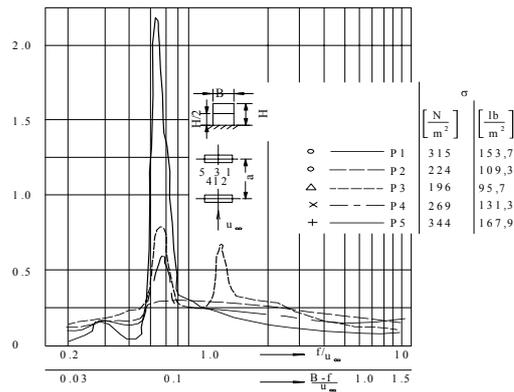


Fig. 4.2: Espectro das pressões flutuantes com modelo situado na esteira (Ruschewey, 1998)

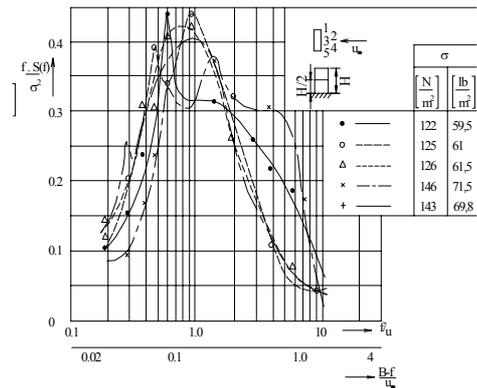


Fig. 4.3 Espectro das pressões flutuantes com modelo considerado isolado (Ruschewey, 1998)

A correlação cruzada entre as pressões medidas nas faces laterais do modelo situado na esteira, exhibe um corrimento no tempo onde a correlação adquire o máximo valor, originando momentos de torção.

Das diferenças observadas entre os esforços medidos, considerando o modelo isolado e posteriormente situado na esteira, conclui-se que a vibração à torção da construção situada a sotavento, incrementa-se por efeito da esteira. A análise do espectro de pressões e dos componentes flutuantes superficiais expressos no domínio de frequência provê indícios de sua origem.

Para avaliar a influência do escoamento turbulento que incide sobre o modelo, Surry e Djakovich (1995) analisaram a correlação entre os espectros de pressões medidos nas faces de um prisma e a turbulência contida nas velocidades para dois tipos de escoamentos correspondentes a categorias de terreno urbano e rural respectivamente. Os espectros de pressão normalizados medidos para vento perpendicular ao edifício quadrado, para terreno de categoria aberto e urbano se apresentam na Figura 4.4.

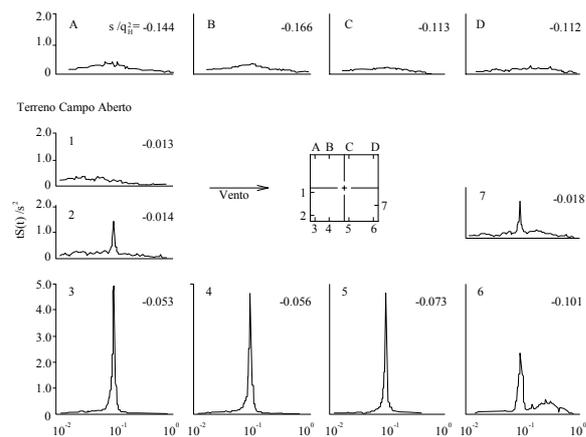


Fig. 4.4 : Densidade espectral reduzida das pressões medidas sobre o modelo em Terreno aberto (1-7) e urbano (A-D) (Surry e Djakovich, 1995)

Os espectros de pressões nas faces paralelas à direção do vento para terreno categoria campo aberto (espectros 3-6), estão constituídos principalmente pelos vórtices de desprendimento. Para o mesmo modelo exposto a um escoamento urbano, as formas espectrais das pressões nas faces paralelas à direção do vento *A*, *B*, *C* e *D* demonstram o efeito do incremento na intensidade da turbulência do escoamento, os vórtices de desprendimento são quase imperceptíveis, torna-se um processo irregular, com o pico de energia distribuído sobre uma faixa de frequência maior. O incremento de energia em frequências menores associa-se com as maiores intensidades de turbulência contidas no escoamento de fundo. Pelo exposto, infere-se a relação entre as características do vento de fundo e o conteúdo de energia na carga originada. Para que as pressões superficiais flutuantes medidas sobre um modelo em túnel de vento se distribuam de forma análoga às geradas pelo vento atmosférico, é necessário reproduzir suas características médias e flutuantes.

Como a distribuição do campo de velocidades flutuantes e o conteúdo de energia cinética contida no vento turbulento dependem da rugosidade superficial sobre a qual a massa de ar se desloca, é imprescindível reproduzir os parâmetros mais importantes da rugosidade.

Para comparar com o espectro de velocidades flutuantes, o espectro de pressões é adimensionalizado. No intervalo de faixas de baixas frequências, o espectro das pressões cai mais abruptamente. Este fenômeno dever-se-ia a que os instrumentos que medem as flutuações de pressão em alta frequência produzem uma atenuação do conteúdo de energia cinética nessas frequências (efeito órgão).

Por último Surry e Djakovich (1995) mediram a correlação cruzada entre um ponto situado sobre o prisma a barlavento e outro situado na corrente livre do vento incidente. O pico da correlação cruzada encontra seu máximo valor em $x/B = 1,2$, sendo x a distância ao ponto onde se mede a velocidade flutuante e B a largura do prisma.

Para $x/B < 0,4$, o valor pico da correlação diminui rapidamente, presumindo que as pressões flutuantes medidas sobre o prisma não são influenciadas pela turbulência do fluxo incidente para uma distância próxima ao prisma. O valor pico para a relação $x/B > 2$ foi pouco maior que o obtido na correlação de velocidade, sugerindo que as flutuações de pressão poder-se-iam expressar como uma transformação linear da velocidade do fluxo turbulento.

Do exposto infere-se que nos ensaios em túnel de vento é necessário que as flutuações contidas no vento incidente sejam reproduzidas no escoamento do túnel de vento. Como as flutuações são provocadas principalmente pelas rugosidades superficiais que constituem o entorno da estrutura, é necessário reproduzi-las no interior do túnel.

4.3 DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DO ENTORNO RUGOSO NAS PRESSÕES MEDIDAS NOS MODELOS

Até aqui destacou-se a importância de reproduzir o entorno superficial que rodeia o modelo em pesquisa, sem precisar ou delimitar a extensão da área de influência. Kiefer e Plate (1998) avaliaram a influência da modelagem do entorno rugoso nas pressões medidas sobre um modelo. Para tanto, modelaram o entorno circundante em forma progressiva, determinando as pressões em função das longitudes rugosas reproduzidas. O modelagem de interesse, realizou-se por etapas, em um raio de $5H$, $9H$ e $38H$ (sendo H a altura do edifício).

Os valores máximos de carga de vento mediram-se em edifício isolado, dependendo das direções do vento médio; além disso, observou-se a diminuição dos coeficientes de pressão médios, ao aumentar o raio de densidade superficial plana reproduzida e uma aproximação assintótica a um valor constante. O esforço destinado a reproduzir com exatidão um ambiente superficial maior não se justifica para uma distância de modelagem de $R = 10H$.

Finalmente, comparados os coeficientes de pressão obtidos em escala natural com os obtidos no ensaio, os resultados coincidem ao aumentar o raio do entorno modelado.

4.4 VARIAÇÃO DOS MOMENTOS DE FLEXÃO E TORÇÃO PROVOCADA PELA PRESENÇA DE OUTRAS EDIFICAÇÕES

Apresentam-se seguidamente os principais trabalhos em túnel de vento que se referem ao efeito de interferência analisado através dos momentos de flexão e torção.

Sykes (1983) analisa o efeito de interferência aerodinâmica de um modelo sobre o modelo principal. As medições se realizaram sobre o modelo principal montado sobre uma balança dinâmica exposto a um escoamento de corte simulado. Posteriormente, mediram-se as cargas do vento ao adicionar alternativamente dois modelos rígidos a barlavento do modelo em estudo, um de dimensão idêntica e outro com a metade da altura, situando-se uma distância de uma altura e deslocados do eixo central longitudinal de uma largura do modelo principal respectivamente (Figura 4.5).

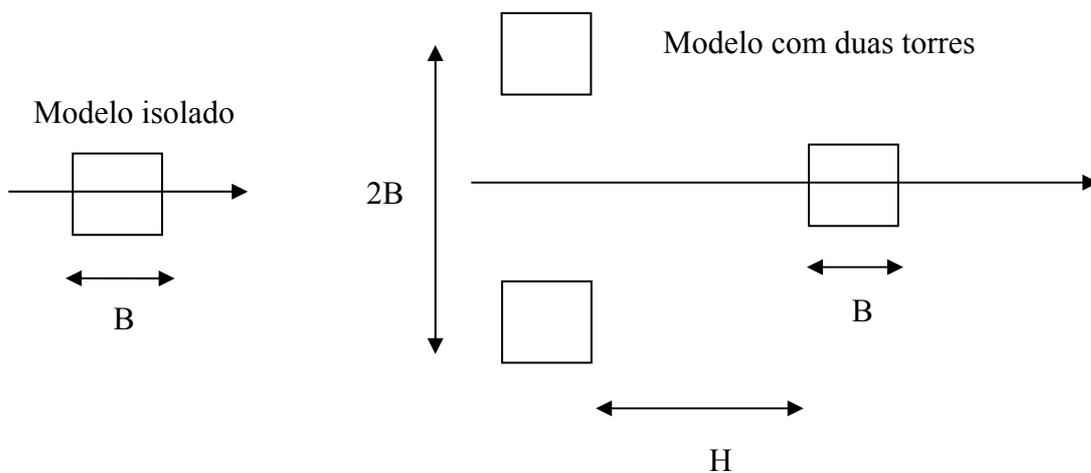


Fig. 4.5: Ensaio do modelo principal isolado e com dois modelos

Mediram-se no modelo amplitudes médias e desvio padrão dos deslocamentos transversais e paralelos à direção do vento. O efeito do obstáculo situado a barlavento do modelo dinâmico foi avaliado através do fator de proteção, constituído pelo quociente entre o coeficiente do momento medido com o modelo a barlavento e o coeficiente do modelo isolado. O coeficiente do momento médio do modelo, com um modelo a barlavento de altura da metade do modelo em estudo, é maior que o coeficiente do momento médio medido no modelo dinâmico considerado isolado. A resposta longitudinal flutuante em geral se duplicou com respeito às obtidas considerando o edifício isolado, quando os modelos se situaram a barlavento e se

deslocaram lateralmente a uma distância de uma largura do modelo dinâmico. O maior coeficiente obtém-se quando o modelo a barlavento é da mesma altura ao principal.

Conclui-se que a resposta longitudinal média de um modelo dinâmico com uma estrutura a barlavento e de altura igual à principal, gera maiores valores do fator de proteção. Reduzindo as dimensões dos modelos do entorno, o efeito de proteção poder-se-ia desestimar. Os ensaios confirmaram a importância de incluir a disposição de modelos nas cercanias do modelo principal, particularmente se a estrutura em questão for de altura similar e próxima à esteira do modelo em estudo.

Os primeiros trabalhos de pesquisa que consideram a influência de mais de um modelo situado no entorno da estrutura principal foram realizados por Saunders e Melbourne (1979), que analisaram os efeitos das rajadas provocadas por um modelo de tamanho similar e das construções gêmeas situadas a barlavento da estrutura de referência exposta a um escoamento de corte de categoria “urbana”, através dos momentos de flexão medidos na base. Os resultados se expressam como fator de rajada, definidos pela relação entre o momento medido com modelo situado no entorno e modelo isolado (Figura 4.6).

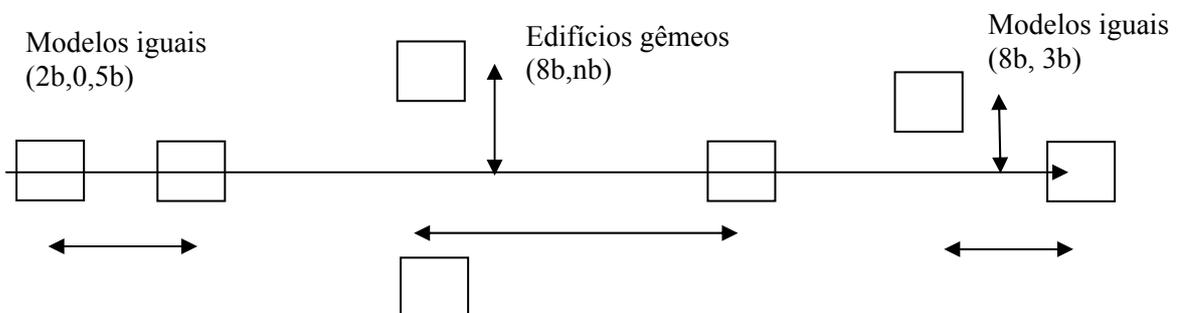


Fig. 4.6: Ensaios do modelo principal isolado e com dois modelos

O modelo de dimensões iguais ao de referência evidenciou que para uma separação de $x = 2b$ a resposta transversal foi significativa, com um valor máximo de 1,9. Para um modelo de menor dimensão em relação ao principal situado nessa mesma posição obtém-se também a resposta transversal, mas com um valor de 1,6.

A máxima resposta longitudinal obteve-se para $(x,y) = (2b;0,5b)$, com um Fator de rajada de 1,94. Além disso, o autor analisou o fator de rajada provocado por edifícios gêmeos situados a barlavento do modelo principal. O maior valor de efeito de rajada foi de 2,13 e 1,87 para a resposta transversal e longitudinal respectivamente para uma localização de $x = 8b$, com

separação variável entre as torres gêmeas. Estes valores são maiores que os obtidos para um modelo das mesmas dimensões situado em $(x,y)=(8b;3b)$. Saunders e Melbourne (1979) concluíram que uma construção de dimensões similares ou menores à referência introduzirá rajadas sobre a construção situada a sotavento. Uma construção adicional formando um par de construções com uma separação de $6b$ amplifica o Fator de rajada.

Thoroddsen, Peterka e Cermak (1998) analisaram os momentos de flexão medidos na base dos modelos e ampliaram o estudo ao vinculá-los com o momento de torção, para verificar o grau de independência entre os momentos induzidos pelo vento. Os objetivos do trabalho foram: 1) verificar se os componentes dos momentos medidos na base no sentido longitudinal e transversal ao do modelo para um prisma retangular, isolado e exposto a um escoamento turbulento são estatisticamente independentes e 2) determinar se as correlações cruzadas entre os momentos na base com respeito aos eixos x e y (coincidente com a direção do fluxo médio e transversal ao mesmo respectivamente) e o momento de torção (eixo z) quando o vento incide normal a sua face são nulas. Se não forem nulas, as correlações são provocadas pela configuração adotada pelo escoamento turbulento ao redor do modelo. Para estruturas retangulares isoladas e vento incidente normal às faces as correlações cruzadas dos momentos deveriam ser nulas.

Dos ensaios realizados, observa-se que os coeficientes de correlação cruzada $M_x - M_y$ e $M_z - M_x$ são nulos quando o vento incide sobre um modelo retangular a 90° , mas o coeficiente de correlação cruzada entre os momentos torção M_z e o momento de giro na base M_y não é zero. O último se deve à organização da estrutura turbulenta do escoamento em torno do.

O efeito de interferência se manifesta de duas maneiras: a) incrementando a carga flutuante como consequência da incidência dos vórtices desprendidos pelas estruturas situadas a barlavento da principal e b) aumentando as correlações cruzadas (R) das cargas que se acoplam pela configuração adquirida pelo escoamento na esteira do edifício a barlavento (Figura 4.7).

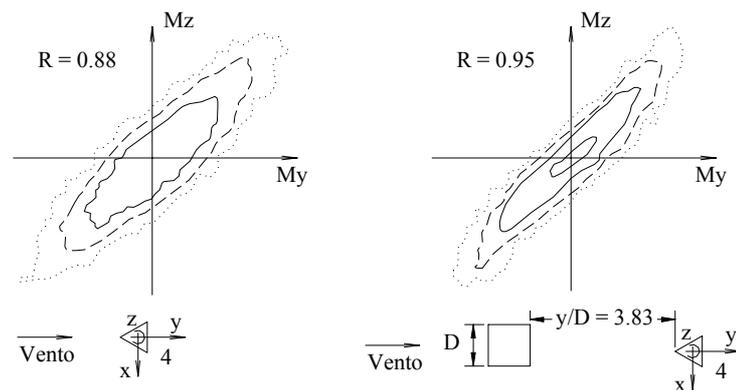


Fig. 4.7: Função de densidade de probabilidade conjunta entre cargas transversais e de torção (Thoroddsen, Peterka e Cermak, 1998).

Thoroddsen et al. (1988) só indica a relação entre os componentes médios das cargas com a direção do escoamento médio, sem referir-se à relação entre os componentes flutuantes da velocidade do vento e das cargas.

É de destacar que ainda para estrutura de seção transversal simétrica, exposta o escoamento turbulento, as correlações cruzadas não são nulas, devido à organização espacial do vento sobre o modelo. Como a direção e a estrutura turbulenta do vento incidente são definidas pelo entorno circundante, conclui-se que a carga determinada sobre uma estrutura sem considerar as perturbações introduzidas ao escoamento por uma rugosidade aleatória, não refletiria o estado real da carga uma vez construída a estrutura.

Zhang, Xu e Kwok (1995) apresentam os resultados de um modelo aerolástico quadrado e alto, desenhado para vibrações de torção. Para provocar perturbações ao escoamento, situaram-se quatro (4) tipos de modelos a barlavento e sotavento do modelo principal.

Os fatores de rajada, sugeridos por Saunders e Melbourne (1979), definem-se como a relação entre as cargas de vento com modelo situado no seu entorno com respeito à resposta do edifício isolado. O fator de rajada se define como a relação entre cargas de torção com modelo no entorno e o modelo isolado.

O desvio padrão da resposta para um modelo quadrado e de dimensões iguais ao modelo principal situado em $(x, y) = (5,5b; 2,5b)$ é de 1,43. Se o modelo se situa corrente acima o valor é menor que 1, indicando que a resposta a torção foi sensível ao bordo da esteira. Uma separação de $5,5b$ corresponde a uma distância de 220m e indica que a energia na esteira do modelo seria percebida a grande distância do mesmo.

O efeito de perturbação na resposta a torção gera-se por diferentes formas e tamanhos de estruturas que constituem o entorno superficial. Consequentemente estudou-se a influência das formas circulares e quadradas de diferentes dimensões. Obtiveram-se, com modelo circular de 0,1m de diâmetro e da mesma altura que o modelo principal, fatores de rajadas de 2,16 em $(x,y)=(4b;1,5b)$. Para o modelo a sotavento não se encontraram efeitos de rajadas maiores que 1.

Além disso, estudou-se a variação das cargas com um modelo quadrado de 0,06m de lado e de altura igual ao do modelo de referência. Obteve-se um fator de rajada de 1,98 em $(x,y)=(3,5b;1,5b)$. A região onde se produziu o máximo efeito de rajada coincidiu para os dois modelos com dimensões características iguais, mas de seção transversal diferentes.

Este último resultado permite inferir que a forma dos obstáculos, referida à reprodução exata da sua forma, não é tão importante quanto à localização e as dimensões. Desta maneira e a fim de simplificar o trabalho de modelagem do ambiente urbano, admitir-se-á como hipótese que as estruturas que o constituem possuem forma prismática quadrada ou retangular, sem que isto introduza alterações importantes nas cargas medidas.

Os espectros de excitação à torção se modificaram pela resposta de rajadas introduzidas pelos edifícios circundantes. A frequência de desprendimento dos vórtices, na esteira de modelos a barlavento, foi visualizada no espectro de torção em forma de picos. Na Figura 4.8 observa-se, no espectro de resposta à torção, um pico para o modelo a barlavento de mesmas dimensões do modelo principal. Para esta localização obteve-se um fator de rajada de 2,23.

Cabe destacar que, no espectro de resposta do modelo isolado, não se observou a presença de vórtices de desprendimento, indicando que o mecanismo de excitação à torção seria a turbulência contida no escoamento de fundo.

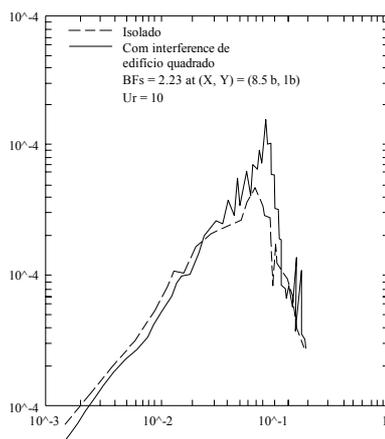


Fig. 4.8: Espectro de potência de torção (Zhang, Xu e Kwok, 1995)

Como se supõe que os modelos principais e os que constituem o ambiente urbano serão de formas retangulares ou quadradas, é de interesse conhecer como a turbulência do escoamento incidente interage com estes modelos e quais são os mecanismos que geram os esforços de torção.

As cargas provocadas pelo vento sobre modelo com eixos de simetria geométrica são consideradas distribuídas em forma simétrica. Os códigos de vento que adotaram esta distribuição de carga não tiveram em conta a aplicação de cargas de vento em forma não uniforme.

As cargas de vento atuam ocasionalmente em forma simétrica, ainda para construções com distribuição simétrica de forma, rigidez e massa. Os momentos de torção médios nestas construções se originam pelas alterações introduzidas pelas rugosidades superficiais no vento incidente e por uma direção de vento média não coincidente com o eixo de simetria da construção.

Uma das cargas mais sensíveis à presença de estruturas no seu entorno imediato com respeito às estruturas isoladas é o momento torção. Isyumov e Poole (1983) analisaram minuciosamente a contribuição ao momento torção das pressões superficiais medidas sobre as faces de um prisma quadrado e retangular, exposto a um vento de corte turbulento.

Para construção prismática de base quadrada: na Figura 4.9 observam-se espectros de pressões superficiais medidos em cada tomada, a soma dos espectros correspondentes às

tomadas situadas na mesma face e sua contribuição ao torque de torção para uma direção de vento incidente de 0° . A contribuição das tomadas 1 e 2 ao torque é relativamente pequena.

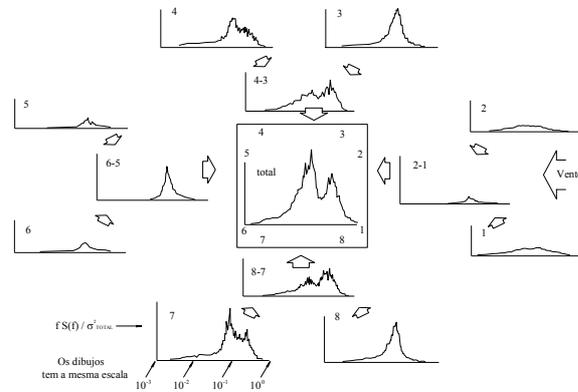


Fig. 4.9: Espectro do momento de torção para um modelo quadrado (Isyumov e Poole, 1983)

As principais contribuições provêm das faces laterais correspondentes às 3-4 e 7-8. Os espectros de pressões nas faces laterais representam aproximadamente 80% da variável do momento de torção total.

Para construção prismática de base retangular com direção de vento de 0° incidindo sobre a face menor (lado maior paralelo à direção do vento), a principal contribuição ao torque coincide com os modelos de seção quadrada; o torque se origina pelas assimetrias das pressões sobre as faces laterais.

Para uma direção de vento de 90° incidindo sobre a face maior, os espectros de potência do torque e das pressões superficiais medidas nas faces do prisma podem ser observados na Figura 4.10. O espectro de torque é sensivelmente diferente para esta direção de vento. A principal contribuição deriva das pressões flutuantes a sotavento induzidas pelos vórtices de desprendimento (tomadas 3 e 4), contribuindo com mais de 80% na variação total do torque. As contribuições ao torque dos espectros medidos a sotavento e barlavento do prisma provêm da assimetria nas pressões flutuantes provocada pela turbulência contida no escoamento.

A distribuição de pressões nas faces laterais do prisma depende fundamentalmente do nível de turbulência do escoamento incidente. Ao maior conteúdo de turbulência, a camada limite sobre o modelo é mais débil, flutuando as pressões com maior intermitência.

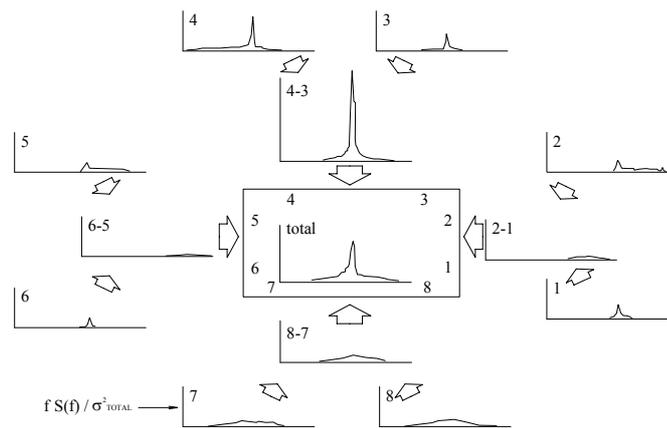


Fig. 4.10: Espectro de potência do momento de torção para um modelo de seção retangular com a face maior exposta ao vento (Isyumov e Poole, 1983).

Na análise efetuada evidencia-se a importância do conteúdo de turbulência no escoamento, como uma das variáveis que contribui para produzir o efeito de torção. A turbulência do vento depende das perturbações introduzidas pela rugosidade superficial. Obter valores similares de intensidade da turbulência em condições controladas requer reproduzir o entorno imediato à estrutura de referência com modelos que introduzam modificações na estrutura turbulenta do escoamento de fundo.

4.5 ANÁLISE DA INTERAÇÃO ENTRE DOIS MODELOS POR MEIO DO QUOCIENTE DOS DESLOCAMENTOS MÁXIMOS.

Mahmood Yahyai et al. (1992) estudaram as variações das cargas originadas pelo vento sobre um prisma de seção quadrada e alta, considerando a resposta dinâmica da construção isolada e na esteira de um modelo rígido e de seção idêntica ao modelo aerolástico. O modelo rígido a barlavento do modelo dinâmico variou a distância no sentido do fluxo médio de $24d$ a $8d$ e em sentido transversal ao escoamento de $0b$ a $4,5b$, sendo b e d a largura e profundidade do modelo respectivamente.

As variações nas cargas medidas na estrutura de referência se analisaram por meio do fator de rajada, definido como o quociente entre o deslocamento máximo medido na parte superior do modelo dinâmico situado na esteira com respeito ao deslocamento do modelo dinâmico isolado (Figura 4.11).

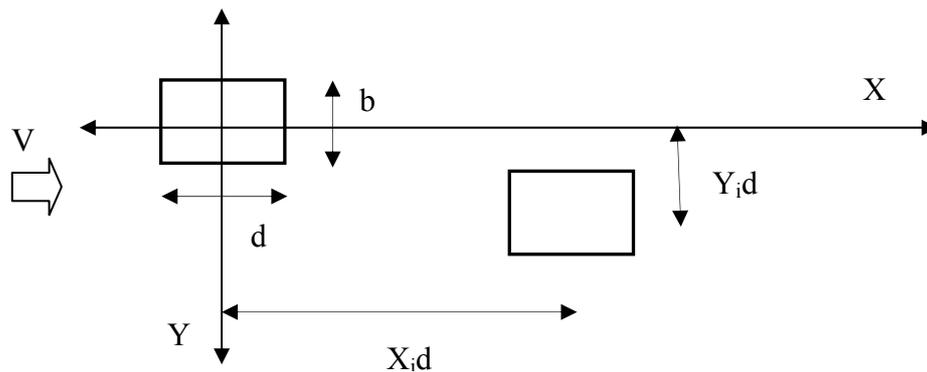


Fig. 4.11: Modelos de ensaios

Conclui-se, das medições obtidas, que a resposta média na direção do escoamento médio diminui, particularmente de $1d$ a $3,5d$, observando-se um efeito de proteção significativa. Se a distância entre os modelos se incrementa, o efeito de proteção diminui e a $12d$ o efeito desaparece. No entanto, para as mesmas situações dos modelos, quando se analisaram as respostas flutuantes em sentido longitudinal e transversal ao fluxo médio, tais fatores tendem à unidade quando o modelo rígido se situa a barlavento sobre o eixo central e próximo ao modelo em questão, mas aumentam se a estrutura dinâmica se expõe aos limites da esteira do modelo rígido, onde existe máxima atividade da turbulência. O fator de rajada máximo de uma resposta longitudinal instantânea ocorre quando o modelo dinâmico está situado em $(x,y) = (3d;2b)$. O máximo fator de rajada para a resposta transversal instantânea é 2,61. O fator de rajada pico ocorre na região de $2,5 < y/d < 6$, devido aos vórtices da camada de corte separada do modelo rígido sincronizam com os vórtices desprendidos do modelo dinâmico. Ao situar-se o modelo rígido corrente abaixo do modelo dinâmico, a uma distância $2d$ a $3d$, o efeito de rajada é maior que a unidade e a $8d$ o efeito desapareceu.

Confirmando estas conclusões, Kareem (1987) investigou em túnel de vento os efeitos de proximidade sobre a resposta dinâmica de corpos angulosos e demonstrou que um ou vários prismas situados corrente acima e do mesmo tamanho que o modelo de referência provocam um aumento do fator de interferência. Os efeitos são mais pronunciados numa camada limite com menor intensidade de turbulência.

Medições de velocidades na esteira da construção sugerem que num escoamento de camada limite, de baixa turbulência, as flutuações na esteira estão mais bem correlacionadas e gera-se

uma carga adversa sobre o prisma situado a sotavento. A adição de turbulência no escoamento distribui a energia da esteira em uma largura de faixa mais ampla e implica menor valor do coeficiente de interferência com respeito a uma camada limite menos turbulenta.

Infere-se, pelo exposto, que a turbulência contida no vento incidente sobre a estrutura definirá a carga sobre a mesma. Assim, para obter fluxos turbulentos em condições controladas, semelhantes aos atmosféricos, é necessário reproduzir em escala a rugosidade superficial imediata, devido a que são os elementos mais importantes que definem a turbulência do fluxo incidente.

4.6 INFLUÊNCIA DAS INTENSIDADES DE TURBULÊNCIA NAS CARGAS NO MODELO.

Saathoff e Melbourne (1999) analisaram a influência de valores da escala integral da turbulência através das pressões medidas nas faces de modelo exposto ao vento turbulento. Os autores concluíram que os valores das pressões flutuantes medidas no modelo para intensidade de turbulência moderada (I_t) aumentam à medida que se incrementa a relação L_x/D , sendo L_x a escala integral da turbulência e D a largura do prisma. Na Figura 4.12 e Figura 4.13 mostram-se medições de pressões e espectros de pressões obtidos nas faces laterais de um prisma para duas relações de L_x/D e uma intensidade de turbulência de 12%. A forma do espectro medido para uma escala da turbulência pequena ($L_x/D=0,36$) não difere da medida em escoamento suave ($L_x/D=1,50$), exceto na magnitude do máximo que é menor, e no menor conteúdo de energia em toda a faixa de frequências do espectro de pressões. Isto indica que o fluxo turbulento à medida que diminui a escala integral, diminui a energia contida no espectro de pressões.

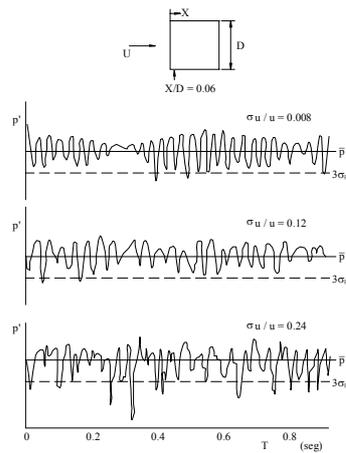


Fig. 4.12: Medições de pressões ($I_t = 12\%$)
(Saathoff e Melbourne, 1999)

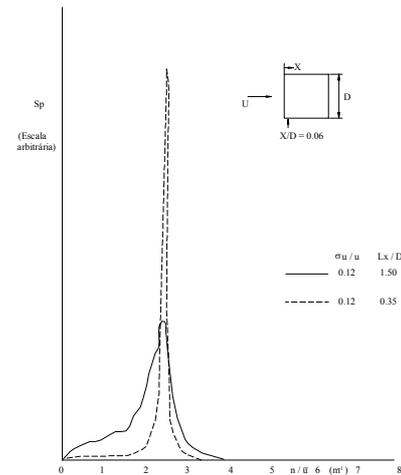


Fig. 4.13: Espectro de pressões superficiais de um prisma ($I_t = 12\%$)
(Saathoff e Melbourne, 1999)

O efeito de aumentar a intensidade e de diminuir a escala integral da turbulência se produz quando o escoamento percorre áreas densamente povoadas, com estruturas de dimensões variáveis, interagindo as esteiras de cada um dos modelos; e seria de esperar que as cargas de vento medidas nestas condições fossem menores que as obtidas considerando a estrutura isolada.

Consistente com o trabalho de Shaathoff, apresentado anteriormente, Akins (1992) analisa a variação das forças médias e os coeficientes de momentos, examinando os efeitos das intensidades da turbulência, a escala integral longitudinal e a turbulência de pequena escala do escoamento de fundo sobre as pressões medidas, observando que os efeitos da turbulência se definiram adequadamente pelo parâmetro que descreve a turbulência de pequena escala.

O parâmetro da turbulência de pequena escala introduzido por Melbourne, é uma medida da magnitude da densidade espectral da componente de velocidade longitudinal reduzida normalizada com o quadrado da velocidade média, para a comprimento de onda correspondente a 10% da dimensão lateral característica da estrutura. O parâmetro da turbulência de pequena escala (S) se define da seguinte maneira:

$$S = \frac{nS(n)}{V^2} \times 10^6 \quad (4.1)$$

avaliado em $\frac{nW}{V} = 10$, sendo n a frequência, $S(n)$ o espectro do componente de velocidade longitudinal, V a velocidade média e W a largura da estrutura. Este conceito mostra a diferença entre a intensidade da turbulência, que é uma medida do conteúdo de energia em todas as escalas presentes no fluxo, e o parâmetro de pequena escala, como medida de contribuição à intensidade da turbulência pelos redemoinhos de pequena escala.

A escala integral da turbulência é definida de maneira similar, mas habitualmente se interpreta como a comprimento de onda correspondente ao máximo da densidade espectral reduzida. As simulações utilizadas em túneis de vento tentam reproduzir a distribuição em escala natural da intensidade da turbulência e a escala integral mediante uma apropriada escala geométrica.

Estas características do escoamento se modelam sem ajustar as pequenas escalas contidas na turbulência do escoamento atmosférico (alta frequência).

As medições mostram que os dados disponíveis para modelos com uma relação de lados de 1,0 a 4,0, o coeficiente de força média na direção x diminui progressivamente com o incremento de S a um valor de 200, a partir do qual permanece constante (Figura 4.14).

O aumento de S provoca o recolamento do escoamento nas faces laterais do prisma, e como consequência disto, a pressão base diminui, reduzindo-se as forças de arraste sobre o prisma.

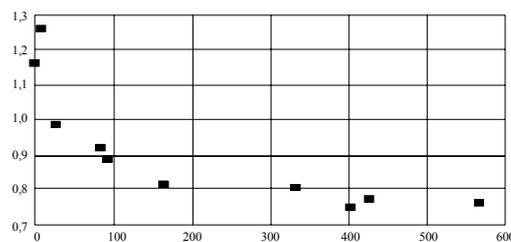


Fig. 4.14: Variação do Coeficiente de arraste com S (Akins, 1992)

Esta tendência se verifica para valores do coeficiente de força como função de intensidade da turbulência medida na parte superior do modelo, existindo maior dispersão dos dados (Figura 4.15).

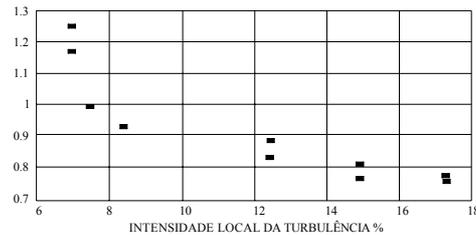


Fig. 4.15: Variação do Coeficiente de força com a I_t (Akins, 1992)

O efeito principal do incremento da energia da turbulência de pequena escala, é reduzir os coeficiente de força. Novamente se confirma, através do coeficiente de pequena escala, que o aumento da intensidade da turbulência provoca uma diminuição dos coeficientes de força, e simultaneamente, aumenta o conteúdo de energia nos redemoinhos de pequena escala.

Pelo exposto, seria de se esperar que, em centros densamente povoados, onde as intensidades de turbulência são máximas, as cargas médias fossem menores que as correspondentes a terrenos suburbanos.

4.7 ANÁLISE DAS CARGAS DO VENTO CONSIDERANDO A INTERAÇÃO ENTRE DOIS MODELOS

Sakamoto e Haniu (1998) analisaram as variações das cargas provocadas pelo vento sobre um edifício alto e próximo a um edifício de altura similar. Na Figura 4.16 mostra-se o equipamento de ensaio utilizado. Mediram-se os coeficientes de arraste e de sustentação (lateral) médio e desvio padrão sobre o prisma de perturbação e o modelo principal disposto em fila ($T/W = 0$).

Os resultados obtidos confirmam que para o modelo localizado a barlavento, o efeito de interferência se manifesta no coeficiente de arraste médio, que diminui rapidamente com a relação S/W até $S/W \cong 3$. Quando $S > 3W$, a camada de corte separada começa a se enrolar periodicamente a sotavento do prisma, C_D começa a incrementar-se e se aproxima ao de um prisma isolado para $S \cong 7W$.

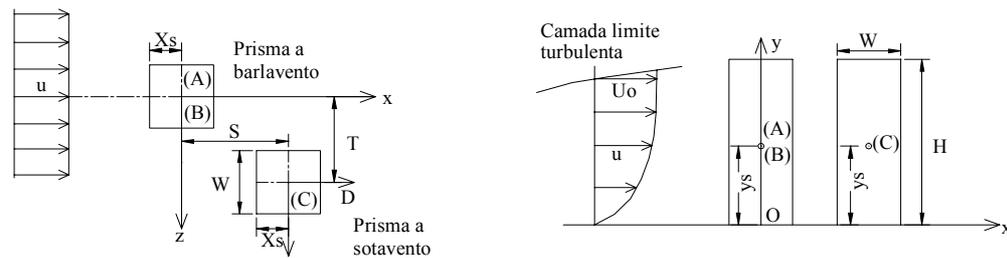


Fig. 4.16: Arranjo Experimental (Sakamoto e Haniu, 1998)

Para o prisma localizado a sotavento, o arraste médio é reduzido para $S/W < 3$, porque a pressão a sotavento é pequena comparada com a pressão a barlavento que é governada pela esteira do prisma localizado a barlavento (sucção), de forma que as pressões a barlavento e sotavento tendem a equilibrar-se.

Quando S supera o valor de $3W$ o C_D aumenta com S/W . No entanto, o coeficiente de arraste do prisma a sotavento apresenta menor valor que o obtido para prisma isolado, ainda para relações de $S/W > 21$. Para separação transversal, o coeficiente de sustentação lateral diminui alcançando seu valor mínimo para a relação $T/W = 1,6$, porque as pressões negativas originadas no espaço interior são maiores que as pressões laterais exteriores, pois a velocidade do escoamento através do espaço entre os dois prismas aumenta. Quando T/W incrementa, o coeficiente de sustentação aumenta (positivamente) até que T/W alcança 6 e desaparece o efeito de interação entre os dois prismas.

Em coincidência com os resultados obtidos por Sakamoto, Luo, Li e Shah (1999) determinaram a variação da força de arraste médio e de sustentação para um edifício quando um modelo de igual dimensão se situa a barlavento. O efeito de interação com respeito ao arraste longitudinal se manifestou até uma separação longitudinal de $16D$ e uma separação lateral de $4D$, sendo D a largura do mesmo.

Complementando o trabalho de Sakamoto (1998), Wong et al. (1995) descreveram os efeitos de interferência entre dois prismas quadrados de diferentes dimensões ao separarem-se lateralmente, variando a relação T/D , sendo T a separação transversal e D a largura do prisma de referência, através da análise da distribuição de pressões em faces laterais, força de arraste e momento de flexão na base. Para $T/D = 1,12$ observa-se o mínimo coeficiente de pressão obtido nas faces laterais confrontadas dos prismas, pela aceleração do escoamento entre o espaço dos dois cilindros. A distribuição da força de sustentação mostra que em

$1,12 \leq T/D \leq 1,375$ os prismas estão submetidos a uma força de sustentação; ao acelerar-se o escoamento através do espaço de separação origina menores pressões sobre as faces laterais confrontadas.

Dois prismas quadrados separados lateralmente apresentam uma região de interação entre ambos modelos. Quando T/D é maior que 2,5 o efeito de interação diminui progressivamente, comportando-se como dois prismas isolados. Estes resultados, ainda sendo menores, explicam através das pressões superficiais as variações medidas nos coeficientes de forças laterais (Sakamoto, 1998).

Bailey (1985) estudou a resposta de uma torre quadrada exposta à excitação dinâmica provocada por um modelo quadrado situado no entorno da estrutura de referência (Figura 4.17). A localização crítica para o modelo situado a sotavento e de geometria similar ao modelo principal é $(x,y)=(-1,5b;1,22b)$ com um fator de rajada de 4,36 para a resposta longitudinal e de 1,73 para a resposta transversal. A localização crítica para o modelo situado corrente acima é $(x=6b-8b;y=3b)$ com um fator de rajada de 1,8.

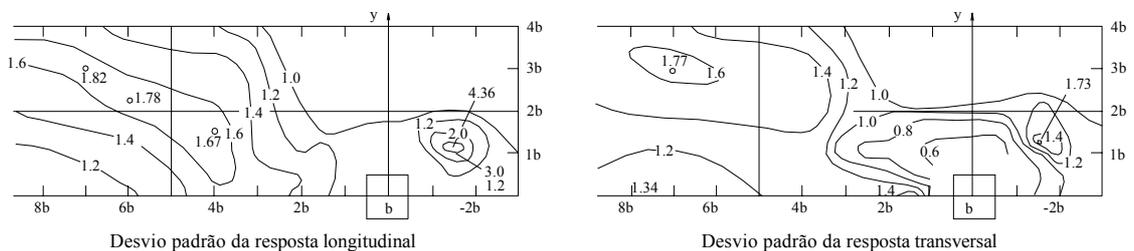


Fig. 4.17: Fator de Rajada para um modelo similar à estrutura de referência (Bailey,1985)

Além disso, Bailey analisou a variação das cargas provocadas por um modelo comparando o espectro de força medido sobre a estrutura e o espectro da velocidade do escoamento, ambos medidos na esteira do modelo. O espectro de força identifica a composição da excitação no domínio de frequência.

O espectro de força medido com o modelo a sotavento na margem da esteira (Figura 4.18) apresenta picos em correspondência com a frequência de desprendimento dos vórtices no modelo corrente acima e transportado pelo escoamento médio. O conteúdo de energia no intervalo de baixa frequência coincide com a construção isolada, mas aumenta significativamente para frequências altas.

Para a mesma separação, mas o modelo a sotavento sem separação lateral (Figura 4.19), o conteúdo de energia a baixa frequência diminui sensivelmente com respeito ao modelo isolado, aumentando novamente a altas frequências. O pico de energia no intervalo de altas frequências desaparece com respeito ao modelo situado nas margens da esteira.

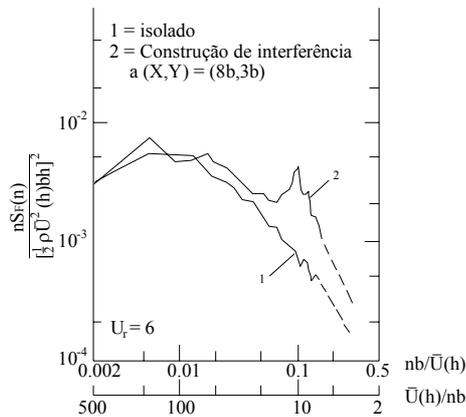


Fig. 4.18: Espectro de Força Normalizada com o modelo a sotavento na margem da esteira (Bailey,1985)

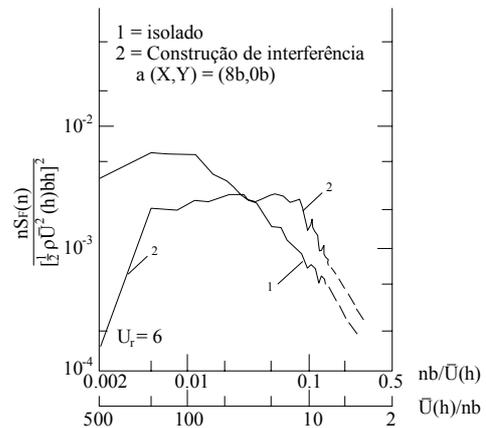


Fig. 4.19: Espectro de Força Normalizada modelo a sotavento sem separação lateral (Bailey,1985)

Realizaram-se outros ensaios com escoamentos mais turbulentos para examinar o efeito da turbulência contida no vento de fundo. Em todos os casos, ao considerar os modelos nas proximidades do principal, as cargas medidas diminuíram. Uma construção situada a barlavento aumentou a faixa de medição de frequências do espectro de força longitudinal e transversal, diminuindo sua amplitude, de maneira similar à que se observa em um escoamento de alta turbulência.

Ao localizar modelos em um escoamento suave, as cargas medidas e comparadas com estrutura isolada se alteraram significativamente, com um fator de rajada máximo de 2,78.

Da revisão realizada nos trabalhos de Sakamoto, Luo, Wong e Bailey compreende-se a importância de reproduzir os modelos que constituem as estruturas que formam o entorno imediato, e que possuem dimensões similares à estrutura em estudo. A presença destas determina as características do escoamento na esteira que, transportada pelo vento médio, incide sobre a estrutura principal.

4.8 TRABALHOS CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DE MODELOS REALIZADOS NA UFRGS

Em 1966 o Professor Joaquim Blessmann realizou um estudo qualitativo, em túnel de vento, da influência nas cargas de uma estrutura, produzido por um modelo em sua cercania. Não obstante as pequenas dimensões do túnel, os efeitos de bloqueio foram minimizadas utilizando modelos pequenos. As medições permitiram obter uma noção da magnitude dos valores esperados e as pressões médias alcançaram valores superiores a três vezes as medidas considerando o modelo isolado.

Blessmann e Riera (1979) realizaram um estudo minucioso das cargas a considerar o corpo isolado e com entorno superficial exposto a um escoamento uniforme e turbulento. Os experimentos realizados em túnel de vento sugerem que os coeficientes aerodinâmicos para estruturas altas devam contemplar a possibilidade da influência de futuras construções no entorno imediato. Determinaram-se, nos ensaios, coeficientes de força, momento de flexão na base e momento de torção. A disposição experimental dos modelos se observa na Figura 4.17.

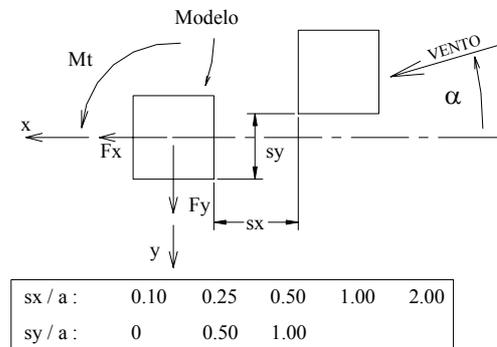


Fig. 4.20: Disposição Experimental dos modelos (Blessmann e Riera, 1979)

Na análise do problema de interação, observou-se substancial incremento no momento de torção, que alcançou valores superiores a três vezes o medido na estrutura isolada (Figura 4.21).

Blessmann (1983) estudou o efeito de interação entre dois modelos altos, expostos aos escoamentos uniforme e turbulento. Os efeitos de vizinhança aumentaram as solicitações com relação ao modelo isolado nas seguintes proporções mostradas na tabela 4.1.

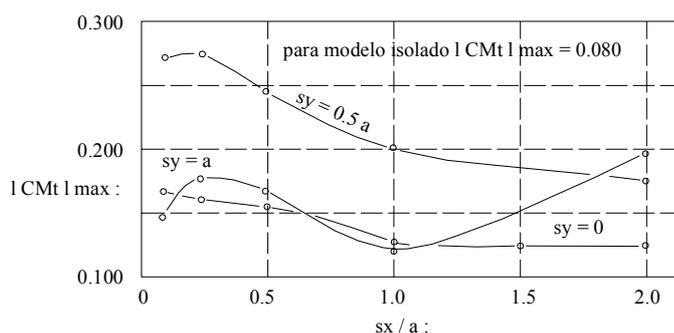


Fig. 4.21: Variação do Coeficiente do Momento de Torção com a separação do modelo (Blessmann e Riera, 1979)

Tabela 4.1: Proporções dos aumentos das solicitações com relação ao modelo isolado (Blessmann, 1983)

	Escoamento turbulento (%)	Escoamento uniforme (%)
Sucções na Tampa	61	54
Sucções nas Paredes	64	38
Força de Arraste	34	34
Momento Torção	128	240

Blessmann (1985, a) realizou uma recompilação e análise teórica dos coeficientes aerodinâmicos de força horizontal, na direção do vento médio e transversal ao mesmo, arraste e momento de torção. Não obstante as normas considerarem o caso de edifícios isolados com suas faces normais à direção do vento médio, nos ensaios realizados em túnel de vento, observou que o coeficiente de torção obtido com as distribuições dos coeficientes de pressão em edifícios de seção retangular e quadrada, triplicam os valores sugeridos pela norma Canadense. Além disso, em edifícios de forma complexa, os coeficientes de torção alcançaram valores cinco vezes superiores ao valor dado pela norma.

Posteriormente, Blessmann e Riera (1985) ampliaram os resultados e conclusões do trabalho anterior e destacaram o interesse de projetistas estruturais que reconhecem que as forças às quais são sujeitas as estruturas altas em centros urbanos são conseqüências de um fenômeno de maior complexidade que os abordados até então. O maior efeito na interação escoamento - estrutura observou-se nas modificações da solicitação do momento de torção. Na Figura 4.22 aprecia-se o aumento do coeficiente da torção para um escoamento uniforme e menos pronunciado no de corte respectivamente.

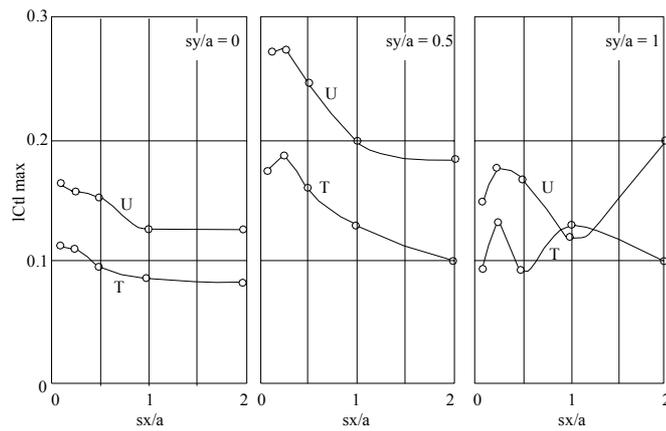


Fig. 4.22: Variação do Coeficiente Máximo de Torção para Escoamento Suave (U) e Turbulento(T) (Blessmann e Riera, 1985)

Na Figura 4.23 apresentam-se os coeficientes de forças horizontais totais para fluxo uniforme e turbulento. No modelo isolado, o coeficiente de força máxima obtido é $C_{máx} = 1,46$ para escoamento uniforme e direção média de $\alpha = 0^\circ$, e $C_{máx} = 1,02$ para $\alpha = 45^\circ$ e escoamento de corte. Estes valores incrementam até 30% quando um modelo de altura similar à de referência se situa nas cercanias (s_x ou $s_y < 0,5a$), sendo a largura da base do modelo.

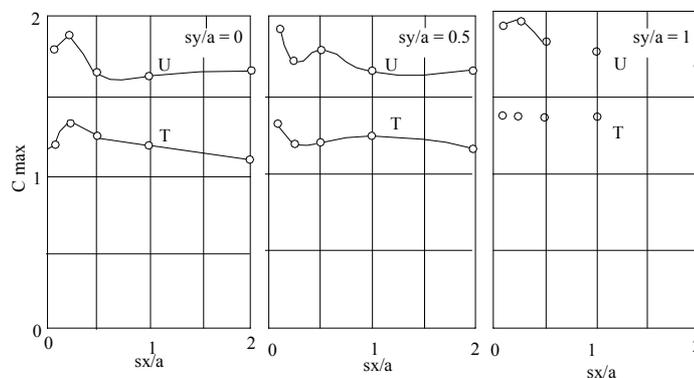


Fig. 4.23: Variação do Coeficiente Máximo de Força para Escoamento Suave (U) e Turbulento(T) (Blessmann e Riera, 1985)

Blessmann (1985, b) analisou as acelerações geradas por um escoamento uniforme e turbulento sobre uma estrutura ao avaliar a influência de um modelo de altura similar. Neste trabalho, o modelo representa uma construção de 17 pisos e sua rigidez foi modelada com material epoxi. Para um escoamento de corte turbulento, os valores do fator de rajada longitudinal se situaram em torno de 1,45 para uma separação $x/a = 2$, e o máximo valor do fator de rajada transversal foi de 1,37. Para um escoamento uniforme, o maior valor é 1,78 na

direção longitudinal e de 1,73 no sentido transversal. Destaca-se que, ao passar de uniforme a turbulento, o fluxo de fundo diminui o esforço medido sobre a estrutura de referência.

Blessmann (1992) apresentou as cargas estáticas provocadas pelo vento ao considerar o entorno nas áreas urbanas sobre dois modelos construídos no Rio de Janeiro e em São Paulo. O estudo foi realizado em túnel de vento com simulação de camada limite atmosférica. Os resultados mostraram um pequeno incremento das forças com respeito ao edifício isolado, mas o momento de torção aumentou 125% para o caso do edifício de São Paulo e 50% para o edifício no Rio de Janeiro.

4.9 ANÁLISE DE VARIAÇÕES DE CARGA EM ESTRUTURAS BAIXAS PROVOCADAS POR ELEMENTOS RUGOSOS

As cargas de vento sobre construções baixas foram investigadas nas últimas duas décadas, devido ao elevado número de construções e ao impacto econômico que representam.

Os códigos prevêem cargas de vento maiores para paredes, telhados e bordos de coberturas, e permitem reduzir as cargas de vento para componentes de grandes áreas tributárias, quer dizer, reconhece-se a correlação espacial reduzida das rajadas de vento sobre grandes áreas.

A otimização nas cargas de projeto, é consequência da compreensão de fenômenos aerodinâmicos gerados em construções baixas, incluindo o efeito de parâmetros geométricos sobre cargas de vento e a interação das mesmas com o sistema estrutural.

Embora os ensaios em túneis de vento tenham se realizado em situações idealizadas, com simulações de terreno a barlavento homogêneo, excepcionalmente considerou-se o efeito do entorno das construções sobre as cargas de vento.

Ho (1990, 1991, 1992) examinou três casos com diferentes entorno imediatos em dois tipos de terrenos simulados a barlavento. No primeiro, estudou os efeitos do entorno real sobre as cargas de vento, denominado “Cidade Aleatória”. No segundo, alterou a localização e o tamanho das rugosidades superficiais, e os modelos se situaram no início da cidade modelada. O terceiro caso analisou a construção isolada exposta a um escoamento homogêneo (caso Construção isolada) (Figura 4.24).

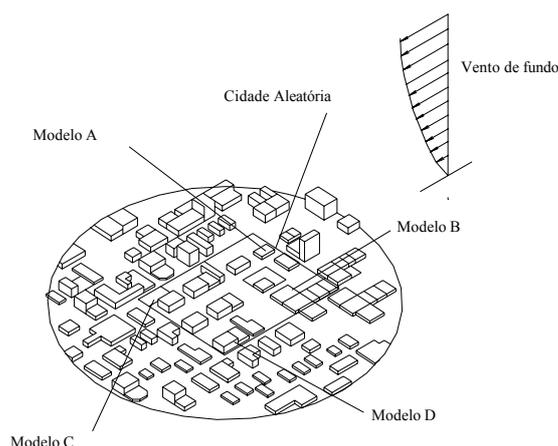


Fig. 4.21: Entorno Superficial do Modelo de Estrutura Baixa (Ho, 1990)

A Construção Isolada produz a máxima carga e o entorno circundante reduz a carga de vento na “Cidade Aleatória”. A variabilidade introduzida pelo entorno se observa na Construção C que está nas vizinhanças de outra construção relativamente alta. Para uma direção de vento incidente situando a construção mais alta corrente abaixo da Construção C, na parede a sotavento da mesma, originam-se pressões positivas e não negativas.

É importante assinalar que, enquanto as altas pressões ou sucções médias geralmente diminuem em entornos complexos, as cargas menores aumentam, isto se deve ao aumento da turbulência provocado pela disposição aleatória da rugosidade superficial.

Para cargas altas, o incremento do componente médio domina o fenômeno reduzindo os valores máximos. Quando se distribui a rugosidade superficial em forma aleatória, observa-se que a variação das cargas medidas sobre o modelo em função da direção do vento médio, tem menor transcendência que se considera o modelo em forma isolada com rugosidade superficial homogênea. Em média, os valores para as cargas medidas a partir da configuração de “Cidade Aleatória” evidencia que as cargas máximas esperadas para construções baixas são menores que as calculadas para a construção isolada.

A cidade denominada segundo caso simulou o entorno de uma área de cidade desenvolvida. As cargas de vento obtidas nesta situação estão compreendidas entre as dos eventos extremos considerados anteriormente (aleatório e isolado). Devido à variação obtida nas cargas para cada situação exposta, adotou-se como critério fixar os coeficientes de carga para um tipo de exposição, em detrimento de maior precisão. A maior variação das cargas de vento obteve-se

com modelos expostos a entorno aleatório, então as diferenças de cargas para os dois terrenos de exposição (isolada e urbano), tornaram-se secundárias.

Historicamente, as cargas de vento contidas nos códigos consideravam como estado de carga provável, o pior estado de carga possível. Utilizar estas cargas implica desconhecer o efeito da variabilidade do entorno circundante sobre as cargas de vento.

Os valores de cargas contidos nos códigos, não são só a média de cargas a produzir-se durante a tormenta de projeto, também não são um conjunto de valores que compreendem o pior caso de carga que se produziria em poucas situações.

Os ensaios em túneis de vento demonstraram que as cargas de vento sobre as construções em entorno reais são diferentes que as com estrutura isolada.

5. ANÁLISE DA CAMADA LIMITE NO TÚNEL DO VENTO.

J. Maeda e M. Makino (1988) disseram que não há publicações de estudos sistemáticos para caracterizar o vento em ambiente urbano, que tenham sido efetuados em túnel de vento, mantendo as características aleatórias de dimensões e situação de elementos rugosos que constituem o entorno urbano. Os estudos realizados referem-se especificamente a modelos físicos que reproduzem o entorno especificamente construído ou modelos que reproduzem ambiente urbano constituído por obstáculos rugosos de dimensões variáveis ou uniformes e disseminados aleatoriamente.

Para analisar a variação do campo de velocidades provocado pela disposição aleatória de entorno superficiais em centros urbanos, em escala natural, construíram-se, na escala 1/300, seis modelos físicos de 26 quadras, considerando as dimensões e a situação dos modelos, como variáveis aleatórias, mantendo em cada um desses modelos, parâmetros estatísticos do entorno real.

Foi analisada a estrutura da camada limite urbana na região inferior. Como não foram realizadas medições das tensões de Reynolds, neste trabalho foi possível reconhecer a presença da subcamada rugosa através de medições e comparações em diferentes alturas de velocidades médias e parâmetros estatísticos da componente flutuante longitudinal do escoamento médio.

5.1 DESCRIÇÃO DO VENTO DE FUNDO

Os ensaios se realizaram no túnel do vento “Jacek P. Gorecki” da Universidad Nacional del Nordeste, túnel de vento de circuito aberto com uma câmara de ensaio de 22,4 m de profundidade por 2,4 m de largura e 1,8 m de altura (Figura 5.1), com uma velocidade máxima com câmara de ensaio vazia 25 m/s (Wittwer et al., 2000).

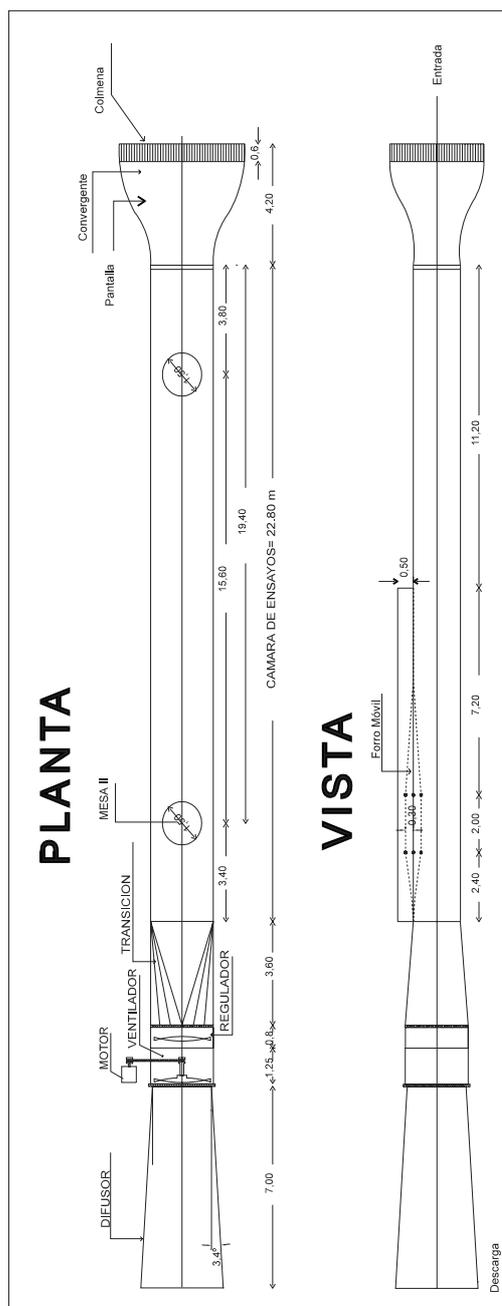


Fig. 5.1: Túnel de vento Prof. Jacek Gorecki

Para gerar o escoamento de camada limite atmosférica implementou-se o método de Counihan. Counihan desenvolveu a técnica RBMD que usualmente é utilizada por sua simplicidade e bom comportamento e sugeriu expressões empíricas para determinar as dimensões geométricas do equipamento de simulação em função da categoria de perfil de vento a reproduzir.

Assim sendo, geram-se como escoamentos de fundo, simulações de camada limite de ventos atmosféricos fortes em atmosfera neutralmente estável correspondente á categoria de terreno

suburbano. Detalhes adicionais como tamanho, geometria e posição do equipamento e critérios de desenho foram reportados por De Bortoli et al. (2002).

Para determinar o perfil vertical de velocidade média e flutuante do escoamento de fundo (Exposure type $S_{ub.}$) a 30, 60 e 120 m na atmosfera, posicionou-se o anemômetro de fio quente no túnel de vento, em escala de simulação obtida com o procedimento sugerido por Cook (1977) de 1/300, nas posições $P_1 = 0,10m$, $P_2 = 0,20m$ e $P_3 = 0,40m$ respectivamente. Em cada posição mediu-se a componente longitudinal flutuante do escoamento, durante 30 segundos com frequência de aquisição de 2000 Hz, que representa cinco tormentas de 10 minutos na atmosfera, com escala de tempo de simulação 1/110.

Para obter o espectro de potência das flutuações de velocidade, aplicou-se aos dados digitais temporais a Transformada Rápida de Fourier. Para suavizar o espectro, utilizaram-se as janelas de Hanning (Bao-Shi Shiaua e Yuan-Bin Chena, 2002) e a média de segmentos, através da técnica de “média móvel”. A média móvel suaviza os picos espectrais em frequências específicas, no entanto, como o espectro obtido caracteriza um tipo de terreno e não as características do espectro na esteira de um obstáculo, é aceitável a técnica proposta porque ela define a forma do espectro em todo o intervalo de frequências de importância, sem introduzir mudanças relevantes.

A escala integral longitudinal da componente flutuante do escoamento médio calculou-se por dois procedimentos. No primeiro, adimensionalizou-se o espectro de potência com o quadrado do desvio padrão e ajustou-se o espectro de Kármán, deixando como parâmetro de ajustamento a macro escala integral da turbulência.

No segundo procedimento, calculou-se a macro escala longitudinal da componente flutuante do escoamento médio aplicando a teoria da Turbulência Congelada de Taylor. Determinou-se a função de autocorrelação da componente flutuante e, por meio da integral da função de autocorrelação normalizada, calculou-se a escala integral temporal da turbulência.

Nas Figuras 5.2 e 5.3 mostram-se as velocidades médias (V) e intensidade da turbulência (I_T) do escoamento de fundo suburbano ($S_{ub.}$) sem o entorno imediato, medidas em P_1 , P_2 e P_3 respectivamente.

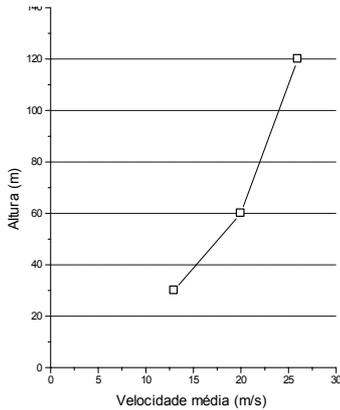


Fig. 5.2: Perfil de velocidade média (Simulação $S_{ub.}$)

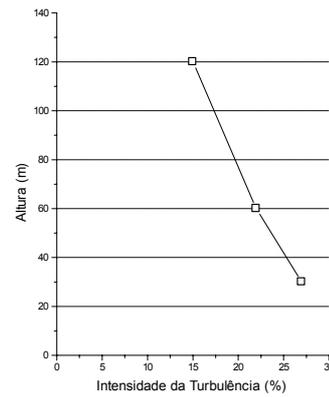


Fig. 5.3: Variação da Intensidade da Turbulência com a altura (Simulação $S_{ub.}$)

Nas Figuras 5.4 e 5.5 observa-se o histograma e a função de autocorrelação correspondente à componente flutuante longitudinal do escoamento médio medido na posição P_1 .

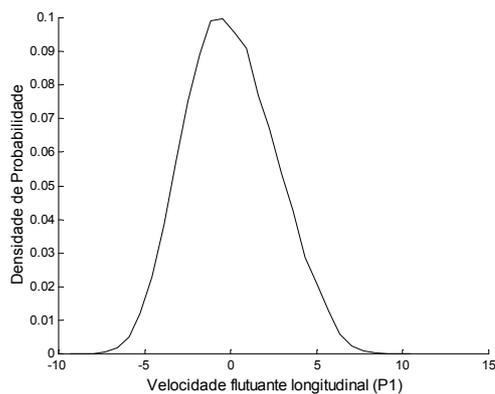


Fig. 5.4: Densidade de probabilidade da componente flutuante longitudinal (P_1)

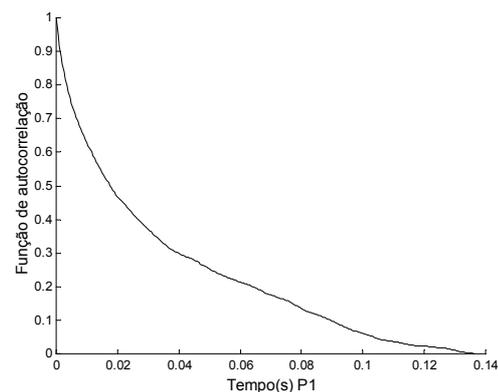


Fig. 5.5: Função de autocorrelação da componente flutuante longitudinal (P_1)

Os espectros de potência da velocidade flutuante longitudinal medidas nas posições P_1 , P_2 e P_3 mostram-se na Figura 5.6. Observam-se duas regiões com comportamentos definidos: uma região do espectro com ordenadas constantes correspondentes a frequências baixas e outra com variação linear para o intervalo de frequências altas.

Obteve-se um espectro simplificado calculando a média das ordenadas até $f \leq 5$ Hz, que representa a energia contida em rajadas de frequências baixas, que geram cargas estáticas. Para determinar a inclinação e a ordenada do espectro no intervalo $30 \leq f \leq 500$ Hz superpôs-se a expressão $y = J2 * e^{-J1*f}$ que se observa na Figura 5.7.

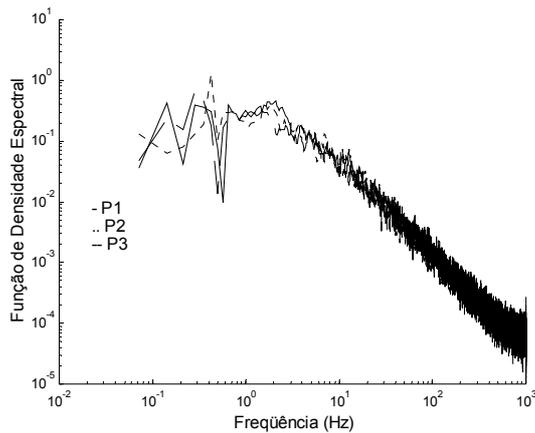


Fig. 5.6: Espectros de potência da velocidade flutuante longitudinal (P_1 , P_2 e P_3)

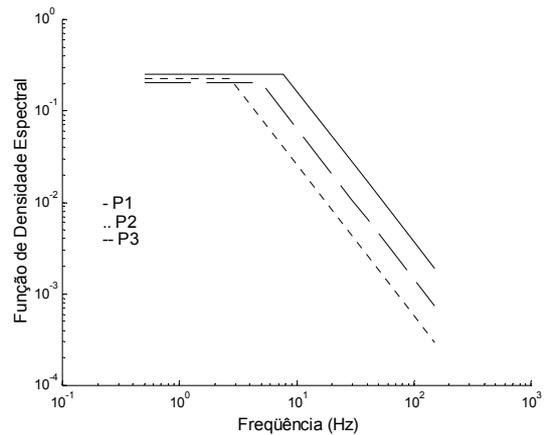


Fig. 5.7: Espectro simplificado de potência da velocidade flutuante longitudinal (P_1 , P_2 e P_3)

Na Figura 5.8 mostra-se o espectro teórico de Von Kármán ajustado ao espectro medido para a posição P_1 . A Figura 5.9, na mesma posição que a anterior, mostra o mesmo espectro superposto com a macroescala longitudinal obtida por meio da função integral de autocorrelação normalizada e a teoria de Taylor.

Na tabela 5.1 apresentam-se macroescalas longitudinais obtidas por ajustamento do espectro de von Kármán (L_{Xe}) e por escala temporal integral de turbulência com a hipótese de Taylor (L_{Xa}).

Tabela 5.1: Macroescalas longitudinais de simulação S_{ub} .

Parâmetros medidos	Simulação S_{ub} .		
	P_1	P_2	P_3
L_{Xe} (m)	0,99	0,64	2,01
L_{Xa} (m)	0,43	0,46	0,56

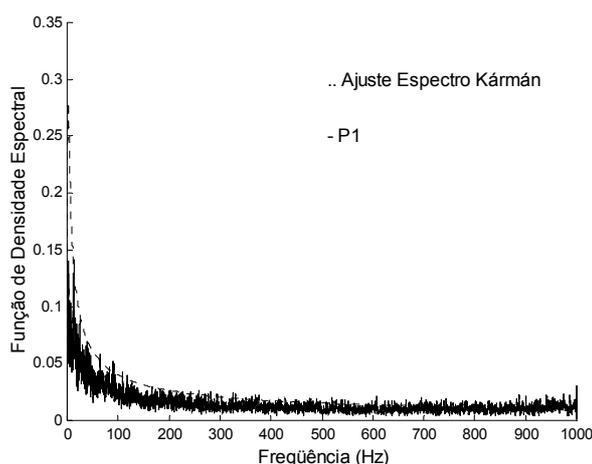


Fig. 5.8: Espectro teórico de Von Kármán ajustado ao espectro medido (P_1)

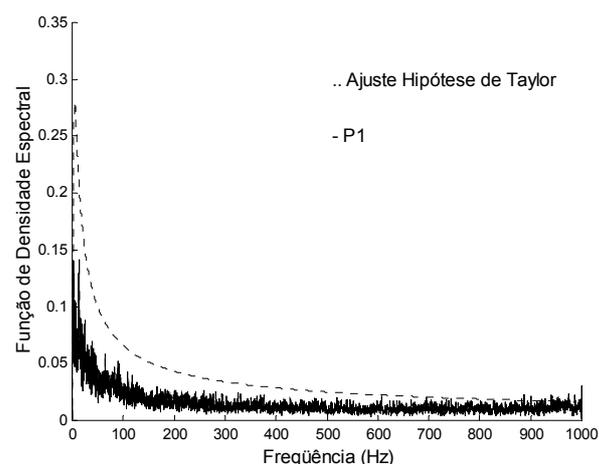


Fig. 5.9: Espectro com a macroescala da função de autocorrelação e teoria de Taylor (P_1)

As Figuras 5.2 a 5.9 mostram resultados característicos de simulações em túnel de vento de camada limite escoando sobre rugosidades superficiais homogêneas. As flutuações de espectros de velocidades instantâneas medidos em diferentes alturas se superpõem com inclinações quase iguais. Em geral, o ajustamento da expressão empírica do espectro de Kármán ao espectro medido, adapta-se em toda a categoria de frequências, o que não acontece quando incluirmos a macroescala obtida pela integral da autoceorrelação e a teoria de Taylor para a posição P_1 .

5.2 VENTO INCIDENTE

Nas Figuras 5.10 e 5.11 mostram-se as simulações dos modelos físicos de ambiente urbano denso e semidenso correspondente à densidade superficial real e metade respectivamente.

Para analisar a variação do campo de velocidades provocado pela disposição aleatória de entornos superficiais em centros urbanos a escala natural, seis modelos físicos de 26 quarteirões foram construídos, a escala 1/300, mantendo, em cada um desses modelos, parâmetros estatísticos do entorno real.

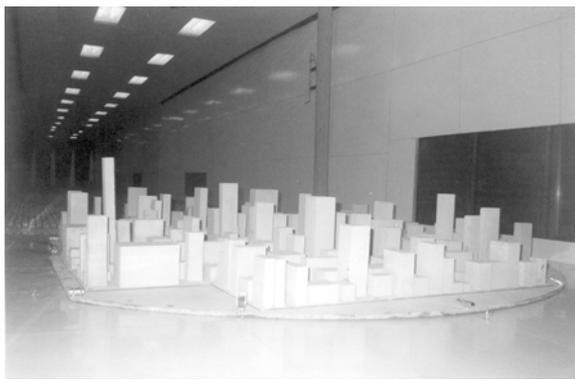


Fig. 5.10: Simulações dos modelos físicos urbanos com densidade superficial real



Fig. 5.11: Simulações dos modelos físicos urbanos com metade de densidade superficial real

A letra indica a simulação do vento de fundo; o primeiro dígito representa o modelo físico do entorno urbano simulado; os três dígitos seguintes representam a direção do escoamento de fundo que varia desde 000° até 330° , em intervalos de 030° e o último dígito representa a posição de medição (P_1 , P_2 ou P_3). Exemplo: S50602 indica vento de fundo suburbano, modelo físico 5, direção do escoamento médio de fundo em 060 (60°) e altura de medição P_2 ($0,40$ m). Na tabela 5.2 mostram-se as simulações de camada limite atmosférica obtidas.

Tabela 5.2: Identificação das simulações

Simulação	Suburbano ($S_{ub.}$)	
	Denso	Semi Denso
1	S1	
2	S2	
3	S3	
4		S4
5		S5
6		S6

5.3 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA DE CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA EM AMBIENTE URBANO.

As técnicas utilizadas para reproduzir as características do vento natural em túnel de vento, consistem no escoamento da camada limite sobre superfície rugosa, constituída por blocos, pedras ou cubos dispostos de maneira uniforme ou aleatória.

Plate (1999) sugere dividir o contorno de velocidade média para escoamento de camada limite turbulenta sobre superfície rugosa em quatro regiões, mantendo semelhança conceitual com a divisão clássica de camada limite turbulenta sobre superfície suave, deduzida teoricamente por meio da equação diferencial de Navier- Stokes, componente da velocidade flutuante, escoamento médio unidimensional e adimensionalizado o perfil de velocidade média com escalas escolhidas convenientemente. As velocidades médias medidas em escoamento de camada limite sobre superfície suave concordam com as hipóteses estabelecidas ao delimitar regiões de escoamento.

Na região inferior perto da superfície, as velocidades médias permanecem aproximadamente constante, e as tensões de Reynolds diminuem abruptamente quando se aproximam à superfície, e a intensidade da turbulência ultrapassa 30%. Esta camada se denomina “cobertura urbana ou camada de cobertura” (canopy layer), e a velocidade do vento depende da forma e da disposição dos elementos rugosos, isto é, ela é tridimensional e não homogênea. A espessura desta “cobertura” aproxima-se à altura do deslocamento do plano zero (d_0).

Prosseguindo, em ordem crescente de altura, identificou-se a região de mistura turbulenta (blending region) de uma espessura próxima a $2d_0$, na qual as velocidades variam do escoamento tridimensional ao bidimensional (forma logarítmica).

Sobre a região anterior, estende-se a região inercial, com variação em altura de velocidades médias, descrita pela lei logarítmica e as tensões de Reynolds, aproximadamente constantes. A espessura média se aproxima de 15% da espessura total da camada limite, maior aquela verificada em camadas limites sobre superfícies suaves, é também, um fator distintivo da camada limite turbulenta sobre superfícies rugosas não homogêneas. A intensidade da turbulência aumenta com o número e a variedade de construções.

Na região superior, o perfil de velocidade média se afasta da lei logarítmica que Coles descreveu e nomeou “função esteira”. Nesta região, a intensidade de turbulência e as tensões de Reynolds diminuem com a altura.

As medições em escala natural e em túnel de vento em escoamentos de camada limite turbulenta em centros urbanos ou sobre superfícies rugosas, indicam que, sobre a camada de cobertura, estende-se uma zona onde as tensões de Reynolds continuam aumentando. Isto não se corresponde com a teoria de camada limite, na qual as tensões de Reynolds deveriam ser constantes e utilizadas como parâmetro de escala local, para definir o perfil logarítmico de velocidades médias.

Theurer, Baeehlin e Plate (1992) realizaram um trabalho minucioso a respeito da estrutura da camada limite urbana, destacaram que os distúrbios introduzidos no escoamento por modelos de alturas variáveis, são significativos e se estendem até $2H_{medio}$, diferentemente do escoamento sobre modelos de altura uniforme, no qual os distúrbios se estendem até a altura dos mesmos.

Para compatibilizar a variação das tensões de Reynolds com as quatro regiões de escoamento, tradicionalmente concebidas até hoje, Rotach (1999) introduziu uma camada nova na estrutura da camada limite em centros urbanos, denominada subcamada rugosa. A subcamada rugosa se estende, por definição, desde a superfície ($z = 0$) até a uma altura z_* , na qual as perturbações geradas pelos elementos individuais rugosos são misturados pela turbulência contida no escoamento. A parte remanescente da camada superficial é, geralmente, denominada subcamada inercial.

A camada atmosférica mais baixa da camada limite urbana, é a subcamada rugosa, em contrapartida da subcamada viscosa sobre paredes suaves. Esta camada tem, a diferença da subcamada viscosa, uma extensão vertical de várias dezenas de metros sobre terrenos urbanos e portanto, é importante quando modelarmos escoamentos ou processos de dispersão em ambiente urbano.

Foi proposta uma série de critérios para determinar a altura z_* , que provém de ensaios em túneis de vento que relacionam a distribuição e a geometria das rugosidades. O critério utilizado para medir velocidades a uma altura onde os efeitos da subcamada rugosa sejam desprezíveis, é medir a partir de $z = h + 1.5D$ sendo h a altura média dos elementos rugosos e

D a separação entre os modelos que constituem o entorno imediato. Os resultados obtidos por Maruyama e H. Ishizahi (1988) confirmaram esta tendência.

O inconveniente, na aplicação desta equação é que o elemento rugoso disposto para gerar a camada limite em túnel de vento, teve uma separação quase constante, o que não é normal em ambiente urbano real. É evidente que o escoamento médio das construções em cidades reais é menos definido que em um experimento em túnel de vento, de maneira que as relações funcionais mais adequadas se baseiam, somente, na altura média h da altura das construções. Assim sendo, para z_* escolheu-se um valor de $z_* = 3h$.

Neste trabalho, analisam-se a variabilidade de velocidades médias, intensidade de turbulência, macroescala integral, macroescala temporal e espectro de potência do componente flutuante longitudinal, medidos em três alturas para seis modelos físicos diferentes.

5.4 MEDIÇÃO DE VELOCIDADES MÉDIAS E FLUTUANTES QUANDO VARIA O ENTORNO IMEDIATO.

No sítio onde se situa o modelo, mediu-se a direção e velocidade do escoamento. Para examinar a incidência da variação da direção do vento de fundo, girou-se 360° o entorno superficial dos modelos físicos, dividindo em 12 direções de 30° cada uma.

Quando virarmos a mesa de ensaio 30°, modifica-se a rugosidade a barlavento e sotavento do modelo, cada entorno superficial é diferente e independente dos outros que compõem o giro. Dessa forma, cada modelo físico construído gera doze tipos de ventos incidentes, caracterizando diferentes ambientes urbanos e mantendo os parâmetros estatísticos do projeto.

Antes de posicionar o anemômetro, situou-se um sensor constituído por um cata-vento alinhada com o eixo longitudinal do túnel conectada a um visor que indica a direção do vento incidente sobre o modelo (Figuras 5.12 e 5.13).



Fig. 5.12: Cata-vento de medição da direção do escoamento médio

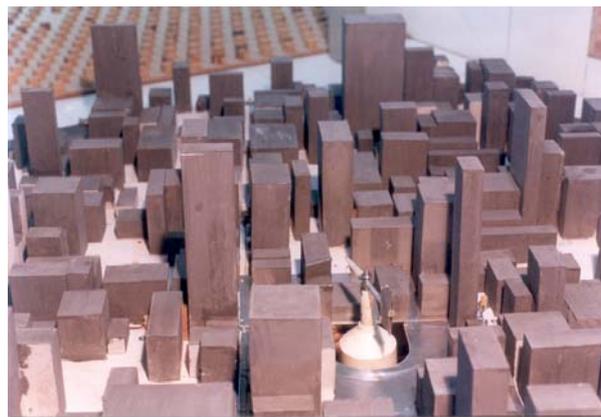


Fig. 5.13: Cata-vento posicionada no modelo físico

A medição da direção do escoamento se realizou em três alturas (posições P_1 , P_2 e P_3), correspondentes à máxima altura dos modelos por experimentar a baixa velocidade, para minimizar o efeito de esteiras de modelos a barlavento.

Depois, situou-se o anemômetro de fio quente em correspondência com a altura máxima dos modelos alinhados na direção do escoamento médio já definido (Figura 5.14). Em cada posição mediu-se a componente flutuante longitudinal do escoamento da mesma maneira que foi descrita no parágrafo 2. Com o tubo Pitot-Prandtl situado a barlavento do modelo físico urbano em região não perturbada, verificou-se a constância da pressão dinâmica de referência.

Com estes valores determinou-se para cada simulação e ângulo de incidência do escoamento de fundo, a três alturas, o ângulo do escoamento médio, velocidade média, intensidade de turbulência local, escala temporal e integral e espectro de potência correspondente ao componente flutuante longitudinal do escoamento médio, pelo procedimento descrito no parágrafo 5.2.



Fig. 5.14: Anemômetro de fio quente

5.5 ANÁLISES DAS CARACTERÍSTICAS DE VELOCIDADES MÉDIAS INCIDENTES COM ESCOAMENTO DE FUNDO SUBURBANO.

A direção do vento médio incidente que resulta da interação do escoamento de fundo e os modelos físicos urbanos densos (S1, S2 e S3) e os modelos físicos com a metade de densidade (S4, S5 e S6), medida em 0,10 m de altura (30 m em atmosfera) quando modificamos a direção do vento de fundo 30° até completar um giro, mudou desde -55° a 30° e -38° a 50° respectivamente.

A respeito das velocidades médias medidas à mesma altura (Figuras 5.15 e 5.16), observam-se, nos modelos físicos menos densos, maiores velocidades. Os modelos físicos mais densos apresentam poucos valores com velocidades superiores a 6 m/s, ultrapassados largamente no modelo menos denso.

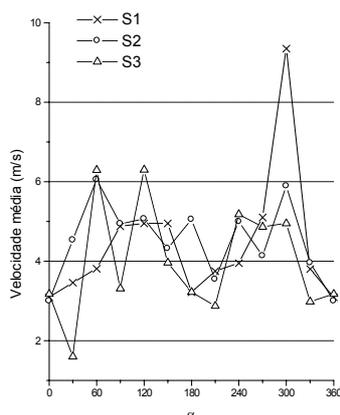


Fig. 5.15: Velocidade média no centro do entorno imediato (P_1)

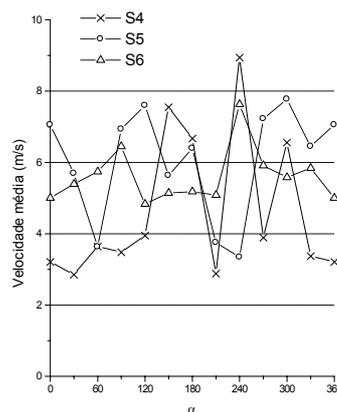


Fig. 5.16: Velocidade média no centro do entorno imediato (P_1)

No início, conclui-se que nessa altura, mantendo constante o escoamento de fundo suburbano, a menor densidade de construção permite medir velocidades médias superiores ao modelo físico de maior densidade.

O gráfico da Figura 5.15 mostra uma tendência a manter a velocidade no intervalo de 3 a 5,5 m/s, com rajadas de até 10 m/s. No entanto, para os modelos físicos S4, S5 e S6, as velocidades médias atingem valores em todo o intervalo de velocidade desde 2 m/s até 9 m/s.

As direções de vento médio incidente medidas na posição P_2 (0,20 m de altura equivalente a 60 m em atmosfera), para diferentes ângulos de incidência do escoamento médio de fundo, mudaram desde -45° a 35° . Nos modelos físicos menos densos a amplitude diminuiu, observando-se que as frequências relativas dos ângulos entre 0° e 20° aumentaram.

Além disso, se compararmos a direção do vento incidente em cada simulação, para a mesma direção do escoamento de fundo a 0,10 e 0,20 m, os ângulos são diferentes, não somente no seu valor absoluto, mas também, em alguns casos, são de sinais diferente, demonstrando que em centros urbanos, a hipótese de perfil vertical de velocidades da componente horizontal com direção única não tem validade.

Nas Figuras 5.17 e 5.18 apresentam-se velocidades médias a 0,20 m. As velocidades médias obtidas em modelos físicos densos são maiores que em modelos menos densos. Se compararmos a velocidade do vento a 0,10 e 0,20 m (Figuras 5.15 - 5.17 e 5.16 - 5.18), observa-se que, nos modelos físicos densos, ela aumenta mais rapidamente que nos modelos

físicos menos densos, invertendo-se a tendência observada a 0,10 m, que a menor densidade superficial construída corresponde maiores velocidades médias.

A aceleração do escoamento medido em modelos densos sugere um escoamento de camada de corte ou altura média rugosa (skimming flow). Se considerarmos a densidade superficial de construção elevada, com uma altura média dos modelos de 0,10 m, a massa de ar desliza-se sobre a cobertura dos modelos, acelerando-se; esta circunstância não se torna evidente quando analisamos as velocidades sobre modelos menos densos.

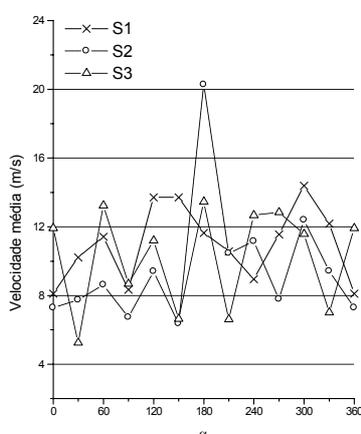


Fig. 5.17: Velocidade média no centro do entorno imediato (P_2)

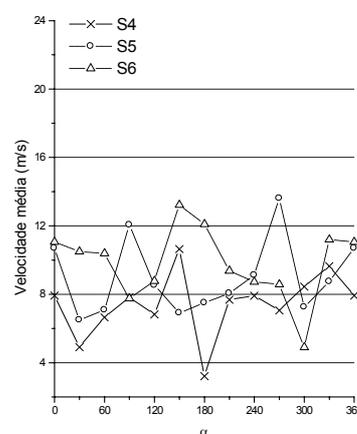


Fig. 5.18: Velocidade média no centro do entorno imediato (P_2)

Para afirmar o exposto, deve-se também, analisar a flutuação das velocidades instantâneas, considerando que no modelo denso, a intensidade de turbulência deveria diminuir como consequência da maior velocidade média e não como consequência da diminuição do desvio padrão.

Como se pode observar na Figura 5.17, nos modelos físicos S1- S2- S3, as velocidades médias permanecem no intervalo de 8 a 12 m/s, na maior parte das posições medidas, tornando evidente, somente em algumas posições, velocidades médias superiores. Isto sugere que estas velocidades altas se devem a que a posição de medição ficou situada na margem de esteira proveniente do modelo alto situado a barlavento da posição de medição.

A respeito dos modelos físicos S4- S5- S6, na Figura 5.18, observou-se que, nas posições medidas, as velocidades médias se repetem em um intervalo de 7 a 8.5 m/s, com velocidades que flutuam em valores superiores e inferiores, com a mesma tendência aproximadamente.

A 0,40 m (120 m em escala natural), os ângulos do vento incidente coincidem com a direção do escoamento de fundo, observando-se que, ao redor dessa altura manifesta-se um contorno de velocidades médias com uma direção única. Nas Figuras 5.19 e 5.20 mostram-se velocidades médias em modelos físicos densos e menos densos.

Geralmente, os modelos físicos S1- S2- S3, possuem velocidades máximas maiores e dispersão menor quando mudamos o ângulo de incidência do vento de fundo, entretanto que os modelos físicos menos densos S4- S5- S6 apresentam maiores variações. Esta situação sugere que, para esta altura, nos modelos físicos densos, se mantenha o fenômeno de skimming flow, no entanto que nos modelos físicos menos densos, estas mudanças responderiam a efeitos de perturbação introduzidos por modelos altos situados a barlavento.

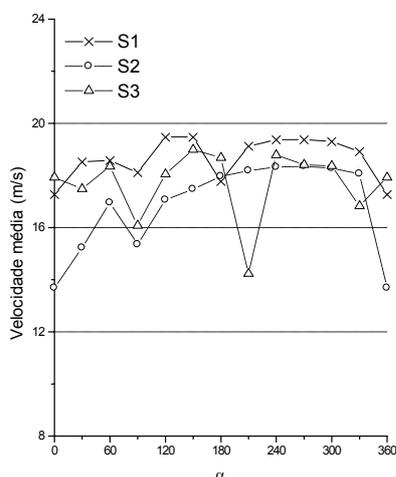


Fig. 5.19: Velocidade média no centro do entorno imediato (P_3)

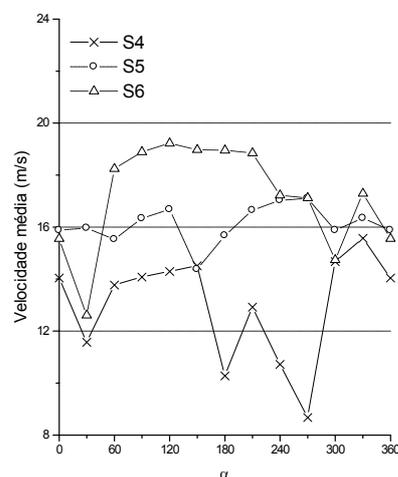


Fig. 5.20: Velocidade média no centro do entorno imediato (P_3)

5.6 ANÁLISES DAS CARACTERÍSTICAS FLUTUANTES DO VENTO INCIDENTE

Nas Figuras 5.21 e 5.22 mostram-se as intensidades da turbulência obtidas a 0,10 m, para os modelos físicos densos e menos densos, quando mudarmos as dimensões e a disposição dos obstáculos superficiais, ficando constante o escoamento de fundo.

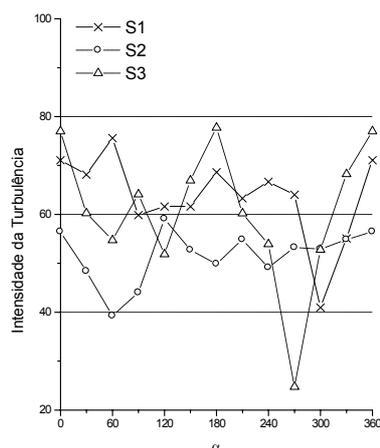


Fig. 5.21: Intensidades da turbulência no centro do entorno imediato (P_1)

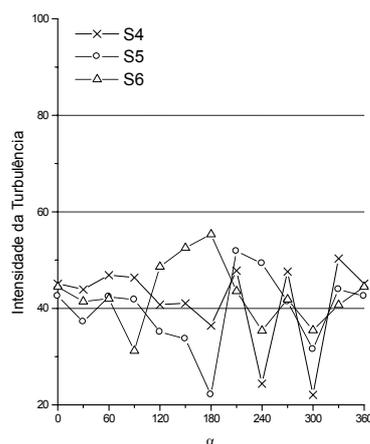


Fig. 5.22: Intensidades da turbulência no centro do entorno imediato (P_1)

Observa-se que as intensidades da turbulência, para entornos superficiais densos, dobram com respeito ao menos denso. Esta diferença significativa se origina por duas causas concorrentes: a primeira causa se relaciona com as menores velocidades médias obtidas no modelo físico denso já mencionado; a segunda causa se refere às flutuações das velocidades instantâneas com respeito à média.

Nas Figuras 5.23 e 5.24 apresenta-se o desvio padrão das velocidades flutuantes correspondentes à intensidade da turbulência a 0,10 m, definidas no parágrafo anterior. Os valores correspondentes ao modelo físico denso são superiores àqueles correspondentes ao modelo físico menos denso.

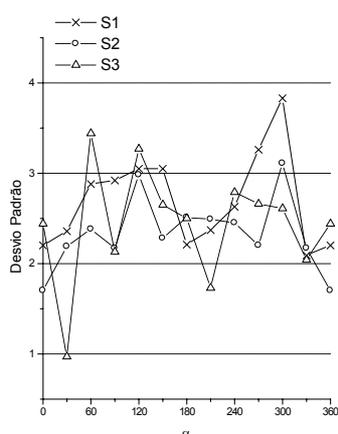


Fig. 5.23: Desvio padrão no centro do entorno imediato (P_1)

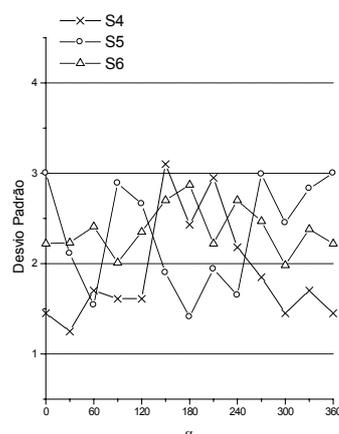


Fig. 5.24: Desvio padrão no centro do entorno imediato (P_1)

Estas causas sugerem que em modelos físicos densos, nessa altura, produz-se uma transferência intensa de quantidade de movimento do escoamento médio para flutuações de velocidades de altas frequências; esses efeitos se tornam evidentes em conteúdos altos de rajadas de vento mostradas na Figura 5.25 que se reflete nos histogramas das velocidades flutuantes obtidas. Na Figura 5.25 e 5.26 mostram-se os histogramas correspondentes a S30901 e S50001. O extremo superior correspondente aos histogramas S30901 sugere velocidades superiores, de alta frequência, responsáveis das rajadas de vento, nessa altura.

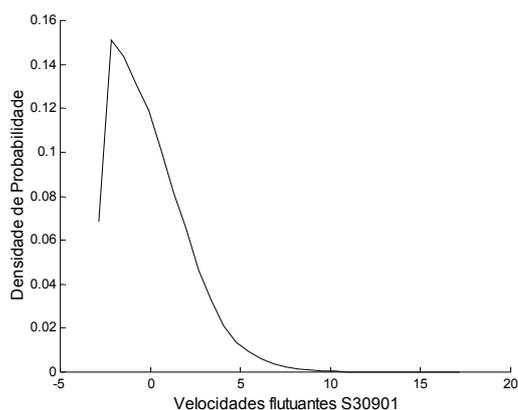


Fig. 5.25: Densidade de Probabilidade da componente flutuante longitudinal (S30901)

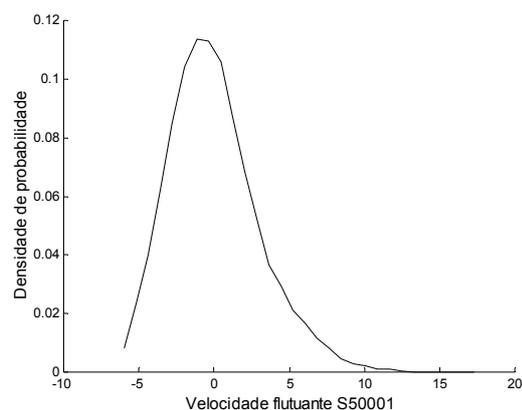


Fig. 5.26: Densidade de Probabilidade da componente flutuante longitudinal (S50001)

Nas Figuras 5.27 e 5.28 apresentam-se intensidades de turbulência quando mudarmos o entorno superficial, em disposição e densidade, mantendo constante o escoamento de fundo, em 0,20 m.

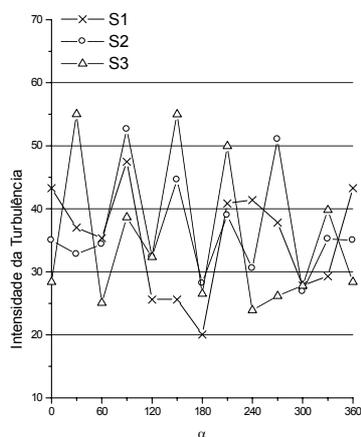


Fig. 5.27: Intensidades da turbulência no centro do entorno imediato (P_2)

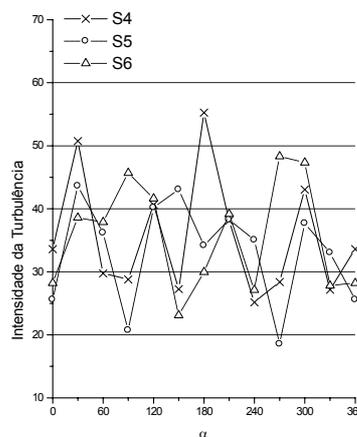


Fig. 5.28: Intensidades da turbulência no centro do entorno imediato (P_2)

Observa-se que, em entornos superficiais densos e menos densos, a intensidade da turbulência permanece na mesma ordem de magnitude, indicando que, nessa altura, a influência da

variação de densidade superficial dos modelos não incide nas flutuações de velocidades instantâneas.

Se compararmos as Figuras 5.21-5.27 e 5.22-5.28, observa-se que a intensidade de turbulência para o entorno denso diminui substancialmente com respeito à intensidade de turbulência medida a 0,10 m, no entanto que no entorno menos denso, a intensidade diminui levemente (continuam no mesmo entorno).

Nas Figuras 5.29 e 5.30 apresenta-se o desvio padrão das velocidades flutuantes correspondentes à intensidade da turbulência a 0,20 m. A diminuição de intensidade de turbulência nos modelos físicos S1- S2- S3 concorda com as maiores velocidades médias obtidas nessa altura, geradas pelo escoamento sobre camada de altura média rugosa (skimming flow). No entanto, os desvios padrão aumentaram com respeito aos valores obtidos a 0,10 m, indicando que nessa altura existe uma região de atividade intensa de transferência de energia do escoamento médio às flutuações de velocidade.

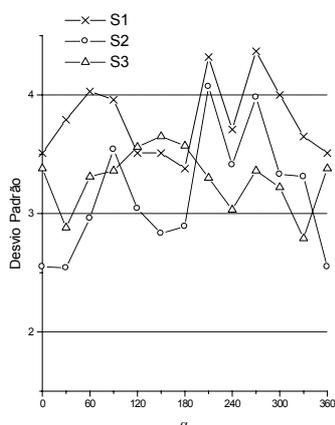


Fig. 5.29: Desvio padrão no centro do entorno imediato (P_2)

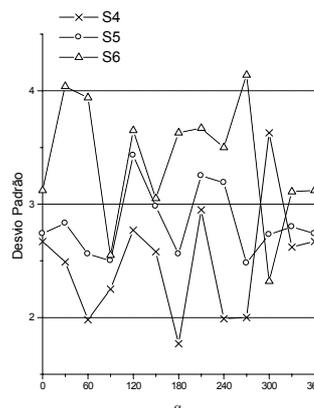


Fig. 5.30: Desvio padrão no centro do entorno imediato (P_2)

Para o entorno menos denso, observa-se também um aumento do desvio padrão, mas quando as velocidades médias não aumentam a intensidade da turbulência se mantém na ordem de magnitude a respeito daquelas observadas a 0,10 m.

Para esta altura de medição, a forma dos histogramas de velocidades para S10002 e S50002, tende para a densidade de probabilidade gaussiana normalizada, devido a sua distribuição simétrica a respeito da origem. No entanto, os histogramas correspondentes aos modelos

físicos mais densos, apresentam ainda uma assimetria do extremo superior, evidenciando para esta densidade superficial, a presença de altas rajadas.

Nas Figuras 5.31 e 5.32 a intensidade da turbulência medida a 0,40 m permanece aproximadamente constante nos modelos físicos densos e menos densos. Comparando as intensidades obtidas a 0,20 m observa-se que elas diminuem.

Como as velocidades médias no modelo denso são superiores às medidas no modelo físico menos denso, para que as intensidades sejam constantes, as primeiras deveriam possuir maiores flutuações de velocidades (desvio padrão).

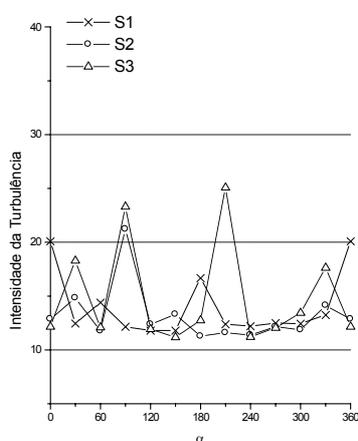


Fig. 5.31: Intensidades da turbulência no centro do entorno imediato (P_3)

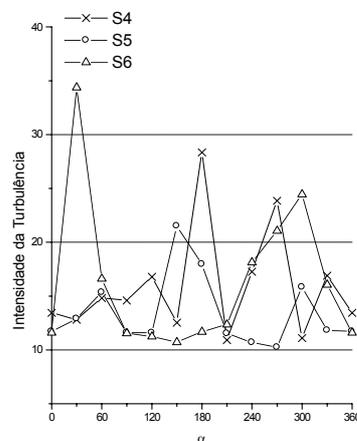


Fig. 5.32: Intensidades da turbulência no centro do entorno imediato (P_3)

Nas Figuras 5.33 e 5.34, comprova-se o exposto anteriormente. O desvio padrão das flutuações de velocidades a 0,40 m, correspondentes aos modelos físicos densos são superiores àqueles dos modelos físicos menos densos.

Nos modelos físicos densos, os valores de desvios padrão permanecem constantes em quase todas as direções de vento incidente, sugerindo que o aumento se deve, principalmente, a uma maior atividade de transferência de energia do escoamento médio.

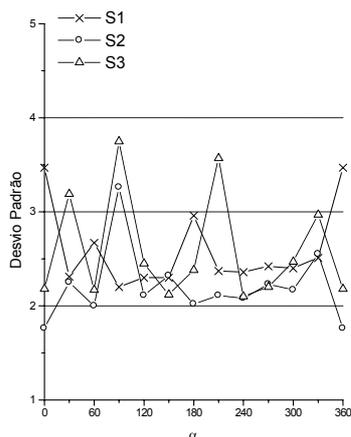


Fig. 5.33: Desvio padrão no centro do entorno imediato (P_3)

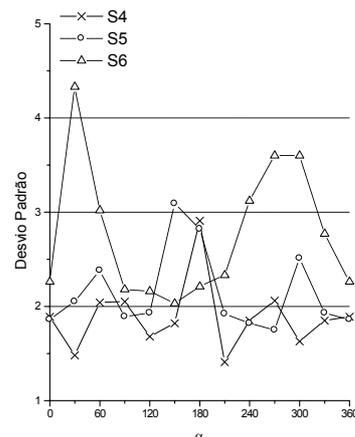


Fig. 5.34: Desvio padrão no centro do entorno imediato (P_3)

Nos modelos físicos menos densos, a maior parte dos valores são menores aos valores obtidos em modelos físicos densos, observando-se máximos valores de desvios padrão em algumas direções de vento incidente. Isto indica que os maiores desvios padrão resultariam de flutuações produzidas pelo efeito de esteira de edifícios altos situados a barlavento da posição de medição.

Para essa altura de medição, a forma dos histogramas de velocidades de S30003 e S50003 tende para a densidade de probabilidade gaussiana normalizada, devido à sua distribuição simétrica com respeito à origem.

5.7 ESPECTRO DE POTÊNCIA DA COMPONENTE FLUTUANTE LONGITUDINAL DO ESCOAMENTO.

Em correspondência às três alturas, em cada modelo físico implementado, mediram-se, para as doze direções do vento de fundo, as velocidades flutuantes do escoamento longitudinal. A técnica utilizada para transformar o sinal digital temporal em espectro de potência, em função da frequência, foi semelhante àquela apresentada no parágrafo 2.

Nas figuras 5.35 e 5.36 mostram-se, como exemplo dos espectros característicos medidos em S23001, superpostos o espectro de Kármán. No primeiro lugar, apresenta-se o espectro ajustado com o parâmetro da macroescala longitudinal; e no segundo lugar, com a macroescala obtida pela integral da função de autocorrelação e a teoria de Taylor.

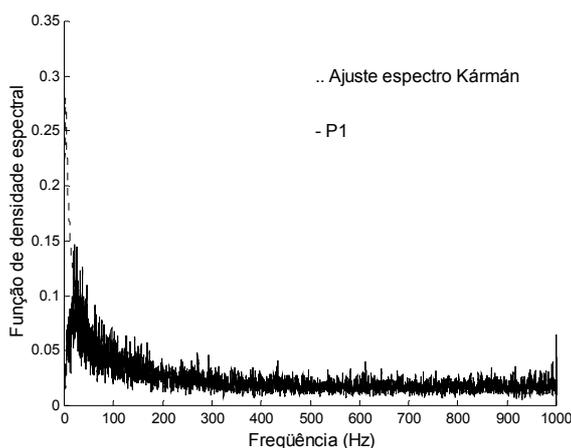


Fig. 5.35: Densidade espectral Kármán ajustado a registro da velocidade S23001 (P_1)

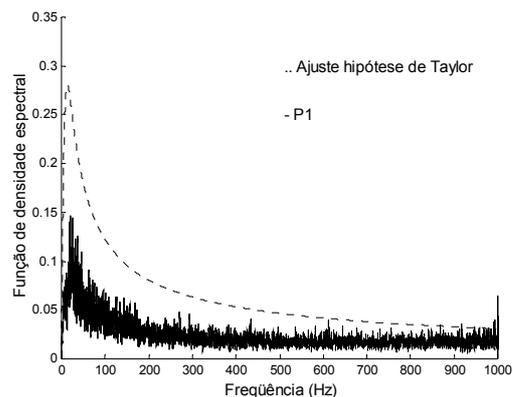


Fig. 5.36: Densidade espectral Kármán ajustado a registro da velocidade S23001 (P_1) com macroescala determinado com a função de autocorrelação

O ajustamento espectral obtido do espectro de Kármán, com a macroescala longitudinal, como parâmetro de ajustamento, concorda com os valores medidos; no entanto, o ajustamento da expressão teórica com a macroescala longitudinal obtida pela teoria de Taylor se afasta do espectro medido, em quase toda a categoria de frequências. Isto indica que a teoria da turbulência congelada de Taylor não é aplicável, nessa altura, devido às altas intensidades de turbulência.

Se compararmos as Figuras 5.9 e 5.36 observa-se que, quando se analisou o vento de fundo, a diferença entre o espectro com a macroescala obtida, aplicando a teoria de Taylor de turbulência congelada com os espectros medidos (S23001) a diferença aumenta e se estende em todo o intervalo de frequência definida.

Na Figura 5.37 mostra-se o espectro dimensional obtido na posição S2300123 e na Figura 5.38 o espectro simplificado.

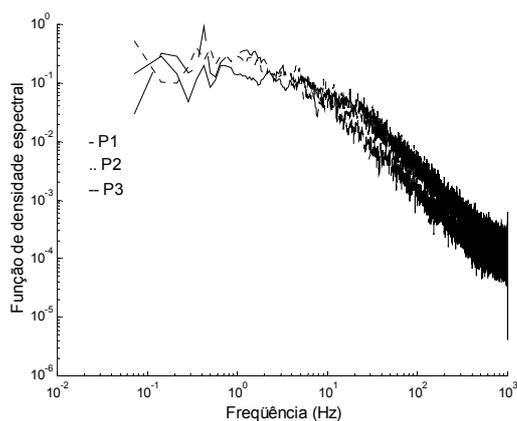


Fig. 5.37: Função de densidade espectral da componente flutuante de velocidade em níveis P_1 , P_2 e P_3 (S2300123).

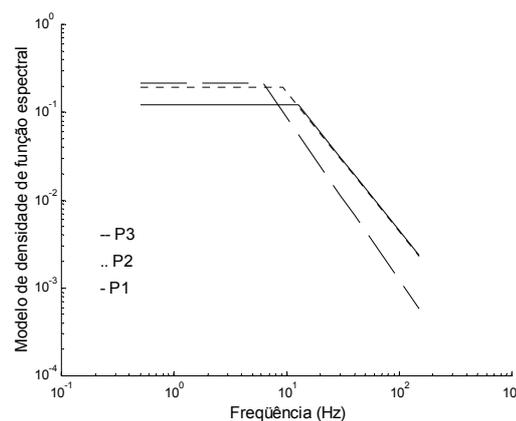


Fig. 5.38: Modelo do espectro simplificado em níveis P_1 , P_2 e P_3 (S2300123).

O espectro medido em P_1 apresenta conteúdos menores de energia a baixa frequência, mas eles aumentam respeito das posições superiores a alta frequência. Isto sugere que, a baixa altura há uma transferência de energia de baixa frequência para velocidades de altas frequências (rajadas). O mesmo se evidencia no espectro simplificado apresentado na Figura 5.38. Esta alteração na forma é geralmente ignorada na recomendação de desenho.

5.8 EFEITO DA VARIAÇÃO DO VENTO DE FUNDO.

Surry (1982) distingue dois campos de velocidade em uma simulação de camada limite atmosférica: vento de fundo, simplificado em túnel como escoamento turbulento sobre terreno relativamente homogêneo e campo de velocidade próximo, provocado por interação de vento de fundo com o entorno detalhado do sítio em consideração.

O escoamento de fundo produz uma camada limite com propriedades médias semelhantes ao vento atmosférico, o entorno próximo fornece uma adequada estrutura do escoamento turbulento, modificando o vento de fundo e definindo velocidades que incidem sobre a estrutura.

A simulação do ambiente urbano em túnel de vento está constituída pelo vento de fundo, caracterizado pelas rugosidades superficiais que rodeiam a cidade e pelo vento próximo, definido pelas dimensões e a situação das estruturas próximas do sítio de medição.

Para simular devem ser construídos dois modelos físicos. Para o primeiro é necessário situar obstáculos desenhados e distribuídos no piso do túnel, ao longo da câmara de ensaios, de acordo com o tipo de escoamento pretendido. O segundo requer informação adicional, considerando que deve ser reproduzido o entorno real do lugar.

O túnel de vento de camada limite da U.N.N.E. possui uma câmara de ensaios de 19 m de comprimento. Túneis com estas características são desenhados para gerar escoamentos de camada limite, obtendo uma ótima reprodução de parâmetros estatísticos do escoamento médio e flutuante do vento atmosférico. Não deve ser subestimadas a importância de reproduzir as características do entorno superficial imediato, pois definem as propriedades do vento incidente, segundo se discute no capítulo II.

Devem ser examinadas ainda detalhadamente as conseqüências da modificação do escoamento de fundo, conforme as exigências do caso real analisado. Cobrir 32 m² do piso do túnel com rugosidades, implica construir (quantidade), logo verificar se os parâmetros estatísticos que descrevem a variação em altura de velocidades médias e componentes flutuantes na direção do escoamento médio, correspondem aos parâmetros do vento atmosférico em escala natural, o que atrasa e encarece as simulações urbanas.

Pelo exposto, foi considerado adequado, neste momento, analisar também, a influência de variar as condições do vento de fundo no caso particular analisado. Para verificar o grau de perturbação que se produz nas velocidades médias e flutuantes medidas na posição de medição, ao variar o escoamento de fundo, manteve-se constante a disposição do entorno superficial modelado (modelos físicos 2 e 3) e se modificou o vento de fundo do terreno categoria suburbano a campo aberto aplicando a técnica de simulação de Standen.

Para analisar a magnitude das alterações ao modificar o escoamento de fundo, foram comparadas as variáveis que caracterizam o vento incidente. Para examinar o escoamento médio, compararam-se direção e magnitude da velocidade média do vento e a respeito da componente flutuante, intensidade de turbulência, macroescala e forma do espectro de potência do componente flutuante longitudinal a 0,10; 0,20 e 0,40 m do piso do túnel respectivamente.

Nas Figuras 5.39 e 5.40 mostram-se as velocidades médias (V) e intensidade da turbulência (I_T) do escoamento de fundo rural (R) sem o entorno imediato, medidas em P_1 , P_2 e P_3 respectivamente.

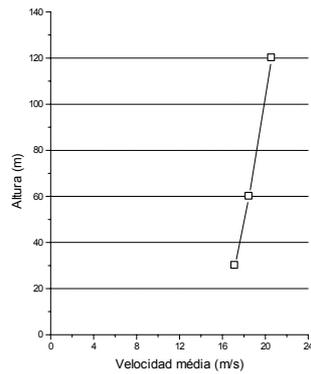


Fig. 5.39: Perfil de velocidade média (Simulação R)

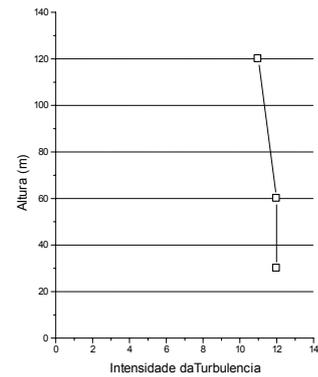


Fig. 5.40: Variação da intensidade da turbulência com a altura (Simulação R)

Nas Figuras 5.41 e 5.42 observa-se o histograma e a função de autocorrelação correspondente à componente flutuante longitudinal do escoamento médio medido na posição P_1 .

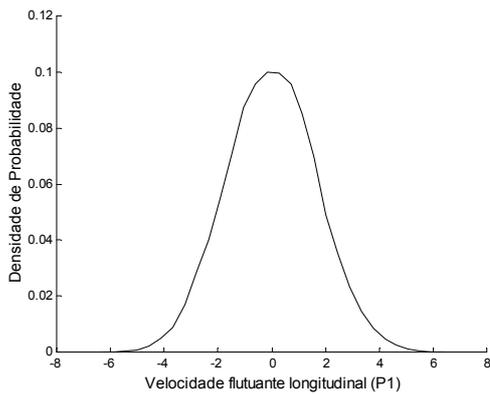


Fig. 5.41: Densidade de probabilidade da componente flutuante longitudinal (P_1)

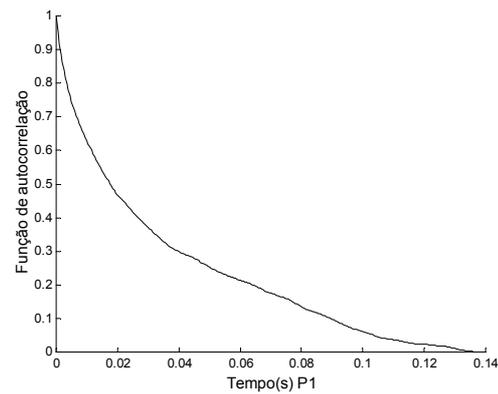


Fig. 5.42: Função de autocorrelação da componente flutuante longitudinal (P_1)

Os espectros de potência da velocidade flutuante longitudinal medida na posição P_1 , P_2 e P_3 mostram-se na Figura 5.43. Observam-se duas regiões com comportamentos definidos: uma região do espectro com ordenadas constantes correspondentes a frequências baixas e outra com variação linear para o intervalo de frequências altas.

Obteve-se um espectro simplificado calculando a média das ordenadas até $f \leq 5$ Hz, que representa a energia contida em rajadas de frequências baixas, que geram cargas estáticas. Para determinar a inclinação e a ordenada do espectro no intervalo $30 \leq f \leq 500$ Hz superpõe-se a expressão $y = J2 * e^{-J1*f}$ que se observa na Figura 5.44.

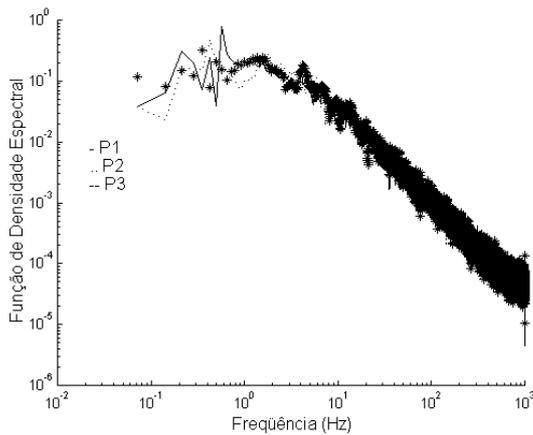


Fig. 5.43: Espectros de potência da velocidade flutuante longitudinal (P_1 , P_2 e P_3)

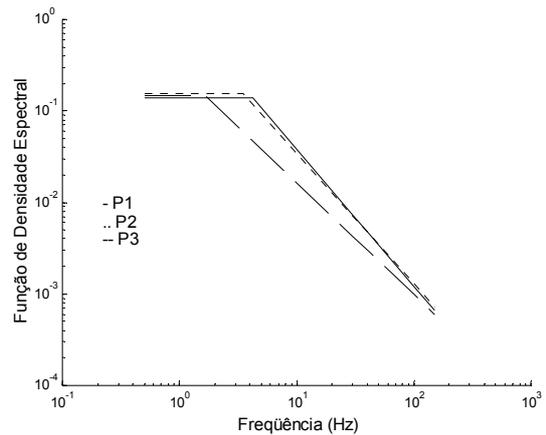


Fig. 5.44: Espectro simplificado de potência da velocidade flutuante longitudinal (P_1 , P_2 e P_3)

Na Figura 5.45 mostra-se o espectro teórico de Von Kármán ajustado ao espectro medido para a posição P_1 . A Figura 5.46, na mesma posição que a anterior, mostra o mesmo espectro superposto com a macroescala longitudinal obtida por meio da função integral de autocorrelação normalizada e a teoria de Taylor.

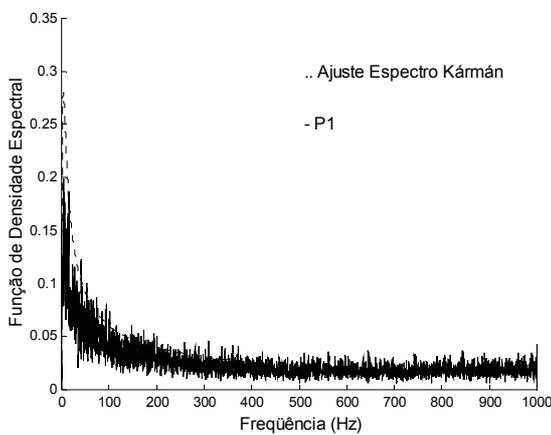


Fig. 5.45: Espectro teórico de Von Kármán ajustado ao espectro medido (P_1)

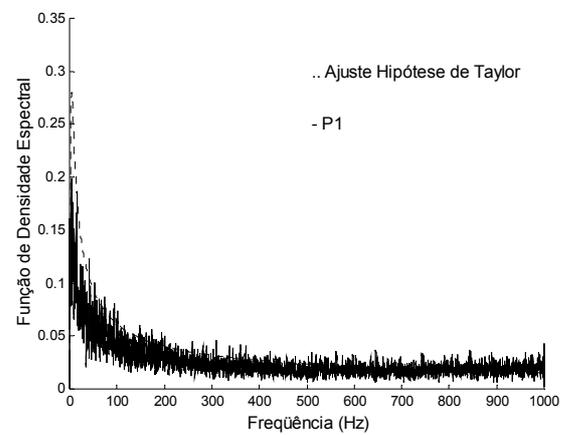


Fig. 5.46: Espectro com a macroescala da função de autocorrelação e teoria de Taylor (P_1)

Na tabela 5.3 apresentam-se macroescalas longitudinais obtidas por ajuste do espectro de von Kármán (L_{Xe}) e por escala temporal integral de turbulência com a hipótese de Taylor (L_{Xa}).

Tabela 5.3: Macroescalas longitudinais de simulação R

Parâmetros medidos	Simulação R		
	P_1	P_2	P_3
L_{Xe} (m)	0,53	0,31	1,00
L_{Xa} (m)	0,51	0,42	0,43

Na tabela 5.4 mostram-se as simulações de camada limite atmosférica comparadas.

Tabela 5.4: Identificação das simulações

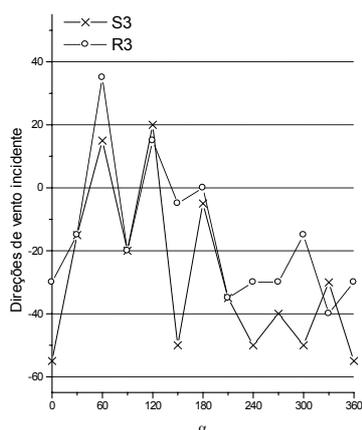
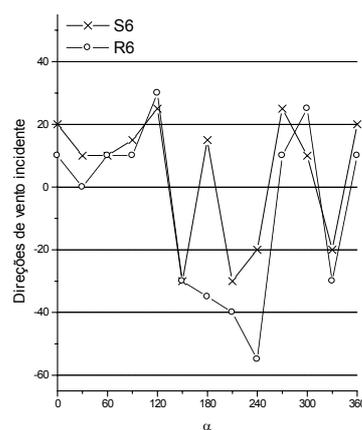
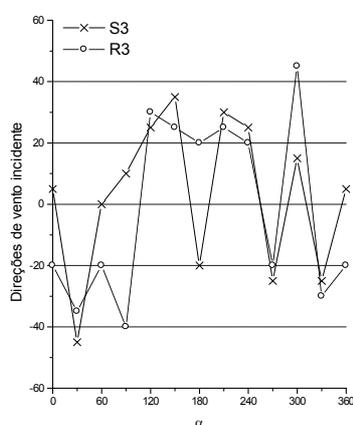
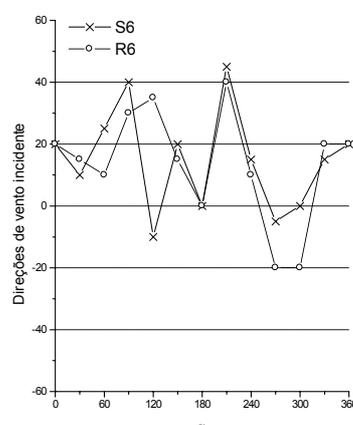
Simulação	Suburbano ($S_{ub.}$)		Rural (R)	
	Denso	Semi- Denso	Denso	Semi Denso
3	S3		R3	
6		S6		R6

5.8.1 Técnica experimental para determinar a direção média temporal no escoamento.

Para verificar a validade da técnica experimental, compara-se a direção num ponto no escoamento turbulento, obtida nas simulações S3- R3 e S6- R6 a 0,10, 0,20 e 0,40 m (P_1 , P_2 e P_3) respectivamente.

Nos dois pares de simulações, o modelo físico permanece constante, variando somente o escoamento de fundo. O entorno imediato influenciou na característica do vento incidente, por isso, para cada volta da mesa de ensaios, nas duas simulações e à mesma altura, as direções do escoamento deveriam ser semelhantes. Não se apresentam os resultados obtidos na altura superior porque não se observaram variações na direção do escoamento médio incidente.

Nas Figuras 5.47 e 5.48, apresentam-se direções de vento incidente quando variamos o escoamento de fundo cada 30° , mantendo os modelos físico denso e menos denso, a 0,10 e nas Figuras 5.49 e 5.50 para 0,20 m (P_1 e P_2) nos modelos físicos S3- R3 e S6- R6 respectivamente. Realizaram-se 52 medições de direções de vento incidente variando a direção do escoamento de fundo e somente 5 apresentaram diferenças.

Fig. 5.47: Direções de vento incidente (P_1)Fig. 5.48: Direções de vento incidente (P_1)Fig. 5.49: Direções de vento incidente (P_2)Fig. 5.50: Direções de vento incidente (P_2)

As direções médias coincidentes, obtidas com a técnica experimental proposta, variando o vento de fundo, mantendo fixos os modelos físicos urbanos, ultrapassa 80%; concluindo que as medidas correspondentes aos ângulos do vento incidente em cada simulação, são confiáveis.

A elevada porcentagem de coincidência sugere que a técnica experimental proposta é aceitável, considerando que, em simulações urbanas, é altamente provável que a veleta fique posicionada na esteira de modelos altos. Quando isto ocorrer, o deslocamento alternado de vórtices, característico desta região, impede posicionar a veleta em uma direção definida, provocando grandes oscilações, e impõe realizar a média visual para definir a direção do escoamento que esta técnica pode minimizar.

5.8.2 Análises de velocidades médias e flutuantes da componente longitudinal do vento incidente.

Nas Figuras 5.47 e 5.48 mostram-se as velocidades médias medidas a 0,10 e nas Figuras 5.51 e 5.52 mostram-se as velocidades médias a 0,20 m quando variarmos o escoamento de fundo suburbano para o rural, mantendo os modelos físicos denso e menos denso respectivamente.

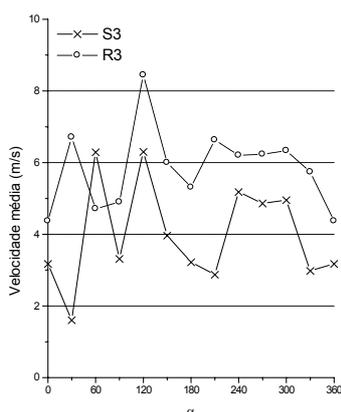


Fig. 5.51: Velocidades médias (P_1)

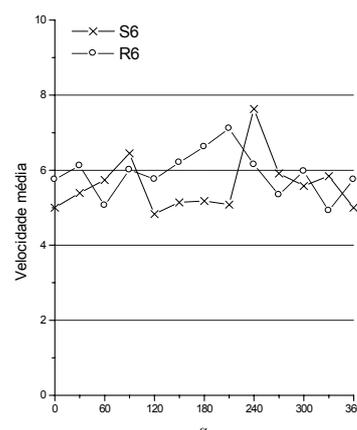


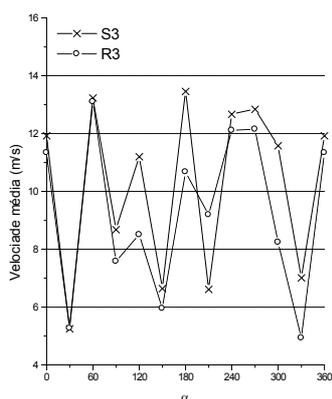
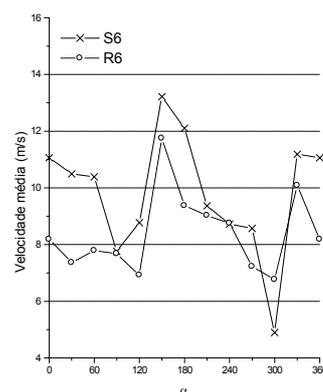
Fig. 5.52: Velocidades médias (P_1)

No entorno superficial denso, quando modificamos o vento de fundo de suburbano para rural, as velocidades médias, neste último, são superiores, como consequência das maiores velocidades médias, na parte próxima ao solo para categoria de terreno rural.

No modelo físico menos denso, a consequência de variar o escoamento de fundo não se percebe claramente. Isto demonstra que, para esta densidade superficial, metade da construção real, as velocidades inferiores são independentes do tipo de escoamento de fundo.

O dito indica que para 0,10 m, mantendo constante o modelo físico, a velocidade média, em um entorno urbano denso, depende do escoamento de fundo, circunstância que se minimiza quando diminuimos a densidade superficial.

Para 0,20 m, a situação antes observada se inverte. Nas Figuras 5.53 e 5.54 mostram-se as velocidades médias medidas nos entornos superficiais menos densos quando variamos o escoamento de fundo de suburbano para rural.

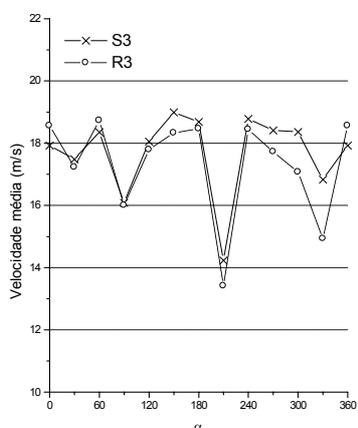
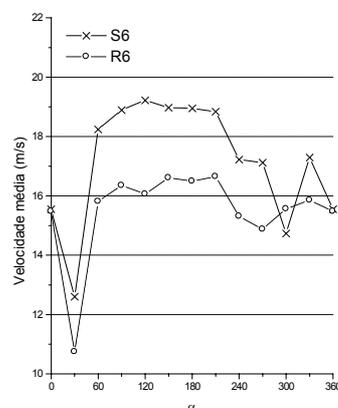
Fig. 5.53: Velocidades médias (P_2)Fig. 5.54: Velocidades médias (P_2)

Para o modelo físico denso, as velocidades, em geral, coincidem no valor, independentemente do vento de fundo.

A respeito da simulação com modelo físico menos denso, repete-se, em geral, o mesmo efeito medido na posição inferior, mais, em algumas posições, as velocidades médias para o escoamento de fundo suburbano são superiores, até 20%.

Nos dois casos observa-se a influência da direção do vento de fundo, tornando evidente a presença de obstáculos superficiais que constituem o entorno imediato à estrutura principal.

As velocidades médias medidas a 0,40 m (Figuras 5.55 e 5.56) para o modelo físico denso e menos denso, quando modificarmos a tendência observada na altura imediatamente anterior. As velocidades médias do vento incidente correspondente a vento de fundo suburbano, em modelos médio denso, são superiores em quase a totalidade das direções incidentes analisadas.

Fig. 5.55: Velocidades médias (P_3)Fig. 5.56: Velocidades médias (P_3)

Na Figura 5.57 e 5.58 observa-se a intensidade de turbulência medida a 0,10 m quando variamos o escoamento de fundo, mantendo fixo o modelo físico. Geralmente, a intensidade da turbulência local, na posição inferior para o escoamento de fundo suburbano com entorno superficial denso é 100% superior com respeito ao escoamento de fundo rural.

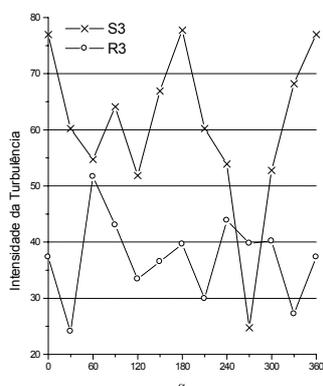


Fig. 5.57: Intensidades da turbulência no centro do entorno imediato (P_1)

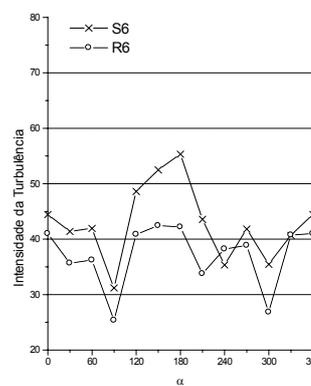


Fig. 5.58: Intensidades da turbulência no centro do entorno imediato (P_1)

Para o modelo físico menos denso, esta diferença é menos notória, mantendo entre os dois valores, uma tendência a conservar a forma de variação.

Para analisar mais detalhadamente a estrutura turbulenta e as diferenças que se geram quando variamos o escoamento de fundo, na Figura 5.59 e 5.60 mostra-se o desvio padrão das flutuações de velocidades medido a 0,10 m.

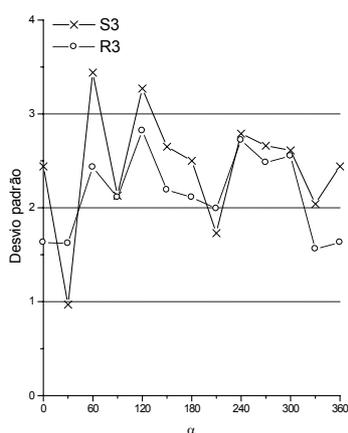


Fig. 5.59: Desvio padrão no centro do entorno imediato (P_1)

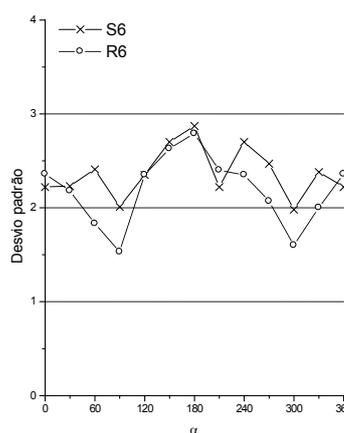


Fig. 5.60: Desvio padrão no centro do entorno imediato (P_1)

Em geral, observa-se que nos dois modelos físicos (denso e menos denso), os valores coincidem nas duas situações. Assim sendo, a diferença observada nas intensidades de

turbulência se devem, principalmente, às diferentes velocidades médias correspondentes a cada posição. Isto prova que para estas densidades superficiais, as velocidades médias, na parte inferior são dependentes do tipo de escoamento de fundo, no entanto, esta influência diminui quando reduzirmos a densidade superficial.

Nas Figuras 5.61 e 5.62, mostram-se a intensidade da turbulência para o modelo físico denso e menos denso medidos a 0,20 m quando variamos o escoamento de fundo.

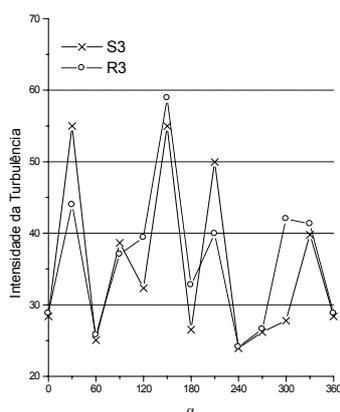


Fig. 5.61: Intensidades da turbulência no centro do entorno imediato (P_2)

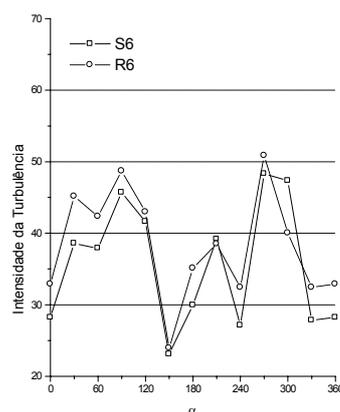


Fig. 5.62: Intensidades da turbulência no centro do entorno imediato (P_2)

Nos dois pares de modelos S3- R3 e S6- R6, a intensidade de turbulência permanece aproximadamente constante, não apresentando diferenças significativas.

No modelo físico menos denso com vento de fundo rural, a intensidade de turbulência aumentou rapidamente com respeito aos valores medidos no escoamento de fundo. Este fato indica que, para ventos de fundo suaves, as características turbulentas adquiridas pela interação da massa de ar com os obstáculos superficiais, são percebidas na estrutura turbulenta do escoamento rapidamente. Para essa altura, a intensidade de turbulência não depende das características do escoamento de fundo, circunstância verificada também com os desvios padrão das amostras respectivas (Figuras 5.63 e 5.64).

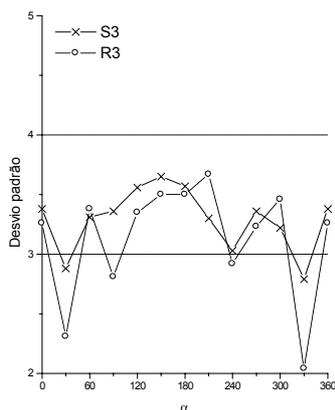


Fig. 5.63: Desvio padrão no centro do entorno imediato (P_2)

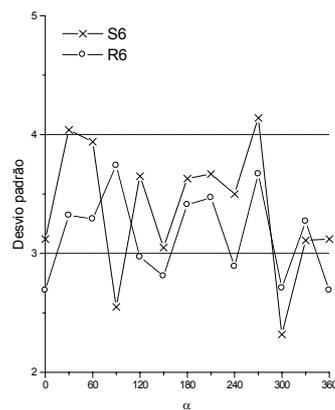


Fig. 5.64: Desvio padrão no centro do entorno imediato (P_2)

Nas Figuras 5.65 e 5.66 mostram-se a intensidade da turbulência para o modelo físico denso e menos denso medidos a 0,40 m quando variamos o escoamento de fundo.

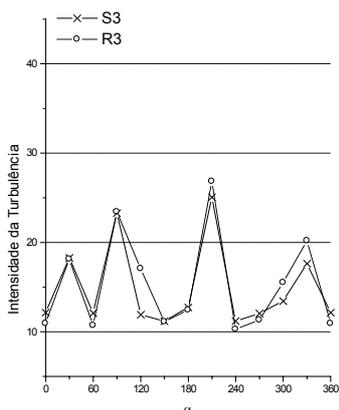


Fig. 5.65: Intensidades da turbulência no centro do entorno imediato (P_3)

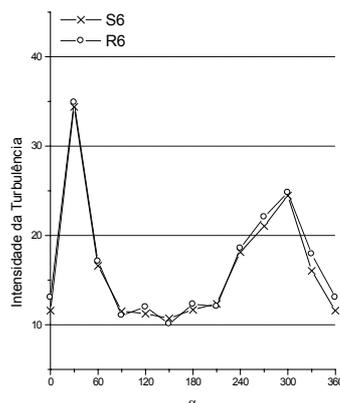


Fig. 5.66: Intensidades da turbulência no centro do entorno imediato (P_3)

Nas Figuras 5.67 e 5.68 mostram-se a desvios padrão das amostras respectivas para o modelo físico denso e menos denso medidos a 0,40 m.

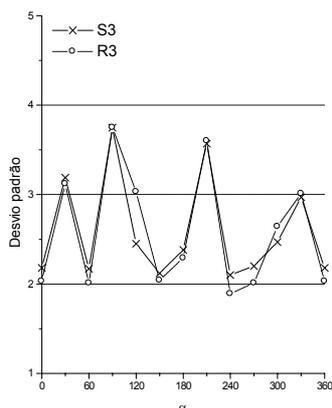


Fig. 5.67: Desvio padrão no centro do entorno imediato (P_3)

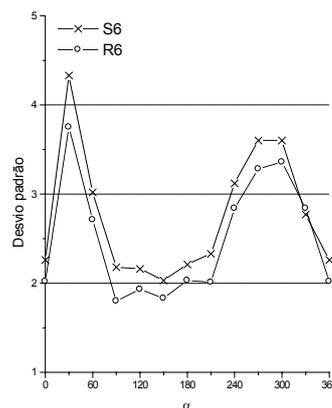


Fig. 5.68: Desvio padrão no centro do entorno imediato (P_3)

A tendência observada na altura imediata anterior verifica-se, de novo, nesta altura.

5.8.3 Espectro de potência da componente flutuante longitudinal.

Neste item, analisar-se-ão se as flutuações de velocidades nos modelos analisados se distribuem em toda a categoria de frequência, ou se em alguns casos, as energias cinéticas das rajadas estão concentradas em uma categoria específica de energia. Nas Figuras 5.69 e 5.70 apresentam-se os espectros de potência adimensional medidos nas posições definidas anteriormente para as simulações S3-R3 e S6-R6.

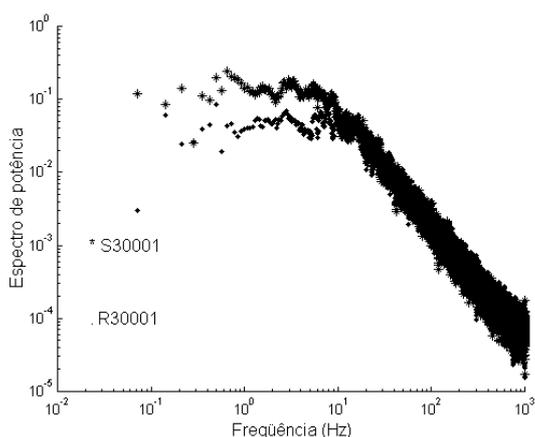


Fig. 5.69: Espectros de potência da velocidade flutuante longitudinal (P_1)

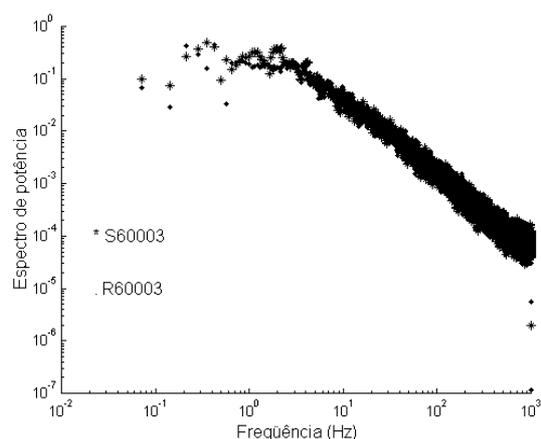


Fig. 5.70: Espectro de potência da velocidade flutuante longitudinal (P_1)

As velocidades médias e a intensidade da turbulência na posição P_1 , para o modelo físico S3 são maiores que as correspondentes ao modelo R3. No entanto, nos dois modelos, os desvios padrão são semelhantes. No espectro de potência dimensional de Figura 5.69 se observa que

para a posição P_1 a baixa frequência as duas ordenadas coincidem, mas a frequência alta, as ordenadas do modelo S3 são superiores àquelas do modelo R3. Isto indica que, mesmo tendo desvio padrão iguais, eles se distribuem em flutuações de velocidade de frequências diferentes. Entretanto para os modelos físicos S6 e R6 os espectros coincidem.

Nas posições P_2 e P_3 , os espectros apresentados nas Figuras 5.71, 5.72, 5.73 e 5.74 para os modelos físicos S3-R3 e S6-R6 os valores estatísticos da componente flutuante coincidem, evidenciando que as flutuações se distribuem de forma similar em todo o intervalo de frequências analisadas.

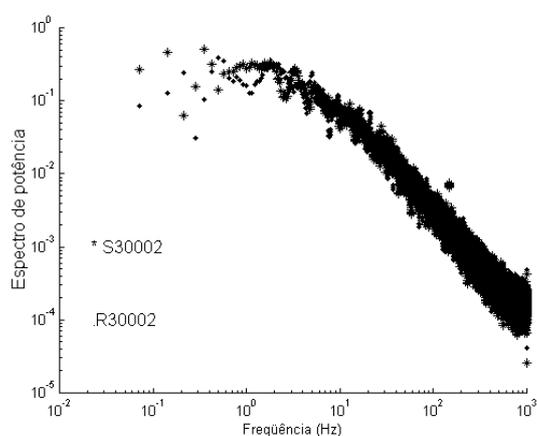


Fig. 5.71: Espectros de potência da velocidade flutuante longitudinal (P_2)

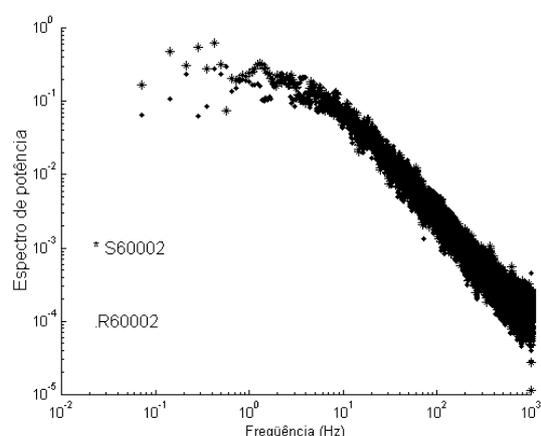


Fig. 5.72: Espectro de potência da velocidade flutuante longitudinal (P_2)

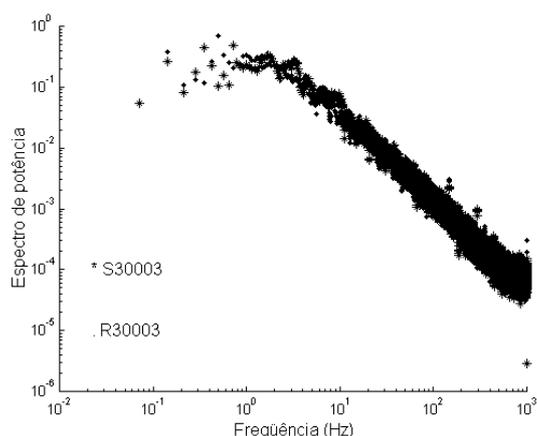


Fig. 5.73: Espectros de potência da velocidade flutuante longitudinal (P_3)

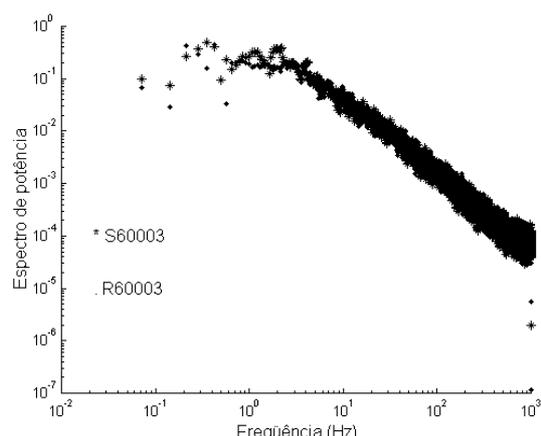


Fig. 5.74: Espectro de potência da velocidade flutuante longitudinal (P_3)

5.9 DISCUSSÃO DE RESULTADOS.

A bibliografia indica que, para verificar a presença e a altura da subcamada rugosa, em camada limite sobre superfície rugosa, é suficiente comprovar que as tensões de Reynolds aumentam com a altura de medição. Neste trabalho, sem haver realizado medições de Tensões de Reynolds, foi possível reconhecer a presença da subcamada rugosa, através de medições e comparações, em diferentes alturas, de velocidades médias e parâmetros estatísticos da componente flutuante longitudinal do escoamento médio.

Os valores medidos indicam que o comportamento do escoamento médio e flutuante coincide com os valores dados por pesquisadores para a região analisada.

As medições se realizaram a uma altura de H_{medio} , $2H_{medio}$ e $4H_{medio}$ dos obstáculos rugosos, verificando-se que o escoamento de camada limite turbulenta em túnel de vento, sobre ambiente urbano, construído em escala, com parâmetros estatísticos obtidos do ambiente urbano real correspondente à cidade de Buenos Aires, é tridimensional, até $2H_{medio}$. Como não se realizaram medições entre 2 e $4H_{medio}$, não pôde ser determinada com maior precisão o limite superior até onde se estende a região de escoamento tridimensional.

Nesta região, o escoamento e a turbulência se modificam por elementos rugosos individuais, conseqüentemente possui uma estrutura tridimensional. Por razões práticas, é conveniente considerar médias espaciais das variáveis de importância para reter a descrição unidimensional (vertical) do escoamento e as características da turbulência.

Desta maneira, na Tabela 5.5, apresentam-se valores de médias, desvio padrão, rajadas de velocidades médias em um segundo e intensidade de turbulência correspondentes aos parâmetros do escoamento médio e flutuante obtido quando variamos a direção do escoamento de fundo de 30° , até completar uma volta, nas três alturas definidas ($P_1 = 0,10\text{m}$; $P_2 = 0,20\text{m}$ e $P_3 = 0,40\text{m}$), para as simulações urbanas com escoamento de fundo suburbano e entornos densos (S1- S2- S3), meio denso (S4- S5- S6) e escoamento de fundo rural (R3-R6). Na última coluna se apresenta o valor médio e desvio padrão correspondente a todas as simulações, na posição respectiva.

Tabela 5.5: Valores médios e desvio padrão dos valores estatísticos.

Variável	Modelos Físicos de simulação de ambiente urbano											
	S1-S2-S3		S4-S5-S6		R3-R6		R3		R6		S _(i) - R _(i)	
	\bar{X}	Desv. Pad.	\bar{X}	Desv. Pad.	\bar{X}	Desv. Pad.	\bar{X}	Desv. Pad.	\bar{X}	Desv. Pad.	\bar{X}	Desv. Pad.
V_{P1}	4,42	1,3	5,4	1,6	6	0,9	6	1,1	6	06	5,2	1,5
V_{P2}	10,2	2,9	8,6	2,3	8,8	2,2	9,1	2,8	8,4	1,5	9,3	2,6
V_{P3}	17,8	1,4	16	2,6	16	1,9	17	1,7	15,3	1,7	16	2,3
$Rg_{P1}(1s)$	3,2	0,8	2,3	0,5	2,2	0,4	2,1	0,5	2,3	0,4	2,3	0,8
$Rg_{P2}(1s)$	2,1	0,4	2,1	0,4	2,2	0,4	2,1	0,4	2,3	0,3	2,1	0,4
$Rg_{P3}(1s)$	1,3	0,1	1,4	0,1	1,4	0,1	1,4	0,1	1,5	0,2	1,4	0,13
IT_{P1}	58	11,1	40	9	36	7,8	36	9,6	37	6	45	13
IT_{P2}	37	9,1	35	8,8	37	8,7	37	9,8	38	7,7	36	9
IT_{P3}	14	3,5	15	5,5	16	6,3	15,6	5,5	17	7,2	15	5

Na tabela 5.6 e na Figura 5.75, apresentam-se os parâmetros determinados quando verificarmos a relação proposta por Kawamura et al. (1988) entre a intensidade de turbulência e a velocidade média de:

$$IT = D_1 V^{-D_2} \quad (5.1)$$

Tabela 5.6 : Parâmetros estatísticos

Parâmetros	Modelos Físicos
	$S_{ub.i} R_j$
D ₁	160,76
D ₂	0,76

Na Tabela 5.7 e na Figura 5.76, apresentam-se os parâmetros determinados quando verificarmos a relação proposta por Kato et al. (1992), entre rajadas e tempo de média.

$$Rg(T) = a - b \log T \quad (5.2)$$

Tabela 5.7: Parâmetros da relação $Rg(T) - T$

Posições	Modelo Físico Ambiente Urbano							
	S1-S2-S3		S4-S5-S6		R3-R6		$S_i - R_j$	
	a	b	a	b	a	b	a	b
P_1	3,19	1,09	2,32	0,66	2,19	0,61	2,61	0,81
P_2	2,05	0,49	2,04	0,49	2,18	0,55	2,08	0,5
P_3	1,33	0,14	1,37	0,15	1,44	0,18	1,37	0,15
Total							2,02	0,49

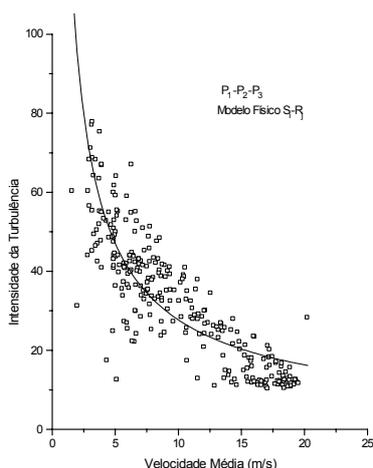


Fig. 5.75: Intensidade da turbulência e velocidade média medida em P_1 para as simulações $S_{ub.i} - R_j$

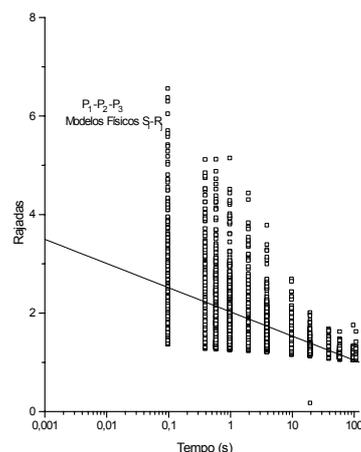


Fig. 5.76: Relação entre o Fator de Rajada e o tempo de média em P_1 para as simulações $S_{ub.i} - R_j$

Na Tabela 5.8 e nas Figuras 5.77 e 5.78, mostram-se os parâmetros obtidos quando relacionarmos Intensidade de Turbulência com rajadas de velocidades, média em 1s em escala natural, e as rajadas médias durante 0,1, 0,4, 0,6, 1, 4, 6, 10, 20, 40, 100 e 110 segundos em escala natural, respectivamente.

$$Rg(T) = A_0 + A_1IT + A_2IT^2 \quad (5.3)$$

Tabela 5.8: Parâmetros da relação $Rg(T) - IT$

T (Tempo de média) (s)	Modelos Físicos Ambientes Urbano $S_{ub.i} - R_j$		
	A_0	A_1	A_2
0,1	1,05	0,028	0,000469
0,4	1,10	0,015	0,000433
0,6	1,11	0,014	0,000425
1	1,13	0,01	0,000408
4	1,18	0,004	0,000283
Total	1,11	0,007	0,000237

Verifica-se que a uma maior intensidade de turbulência correspondem maiores rajadas.

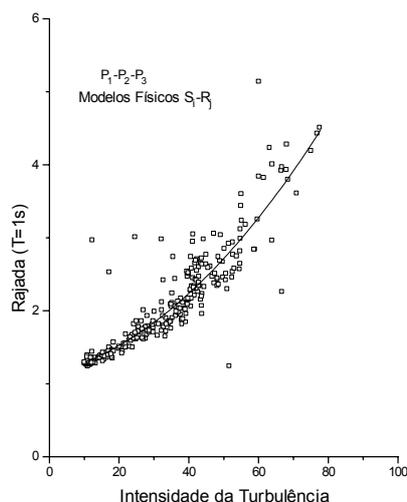


Fig. 5.77: Relação entre IT e velocidades máximas para P_i nas simulações $S_{ub.i} - R_j$

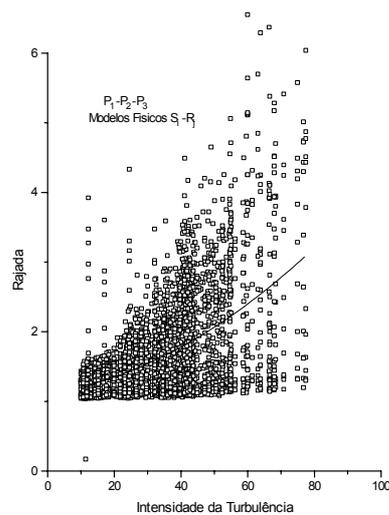


Fig. 5.78: Relação entre IT e rajadas médias para todos os tempos em P_i nas simulações $S_{ub.i} - R_j$

Também se verificou a relação funcional entre rajadas de vento e velocidade média fornecida por:

$$Rg(s) = K_1 V^{-K_2} \quad (5.4)$$

Isso sugere que quando aumentamos a velocidade média, as rajadas de velocidade diminuem e tendem a um valor constante. Os parâmetros obtidos pelo ajuste da relação, mostram-se na Tabela 5.9 e nas Figuras 5.79 e 5.80; observa-se o ajuste da expressão proposta para rajadas médias em um segundo e para rajadas médias durante 0,1, 0,4, 0,6, 1, 4, 6, 10, 20, 40, 100 e 110 segundos, em escala natural.

Tabela 5.9: Parâmetros da relação rajada- V média.

Parâmetro	Valores médios ($S_{ub.i} - R_j$)						
	Tempo T (s)						
	0,1	0,4	0,6	1	4	10	Total
K_1	0,71	0,62	0,63	0,57	0,43	0,23	0,81
K_2	11,7	8,15	8,22	7,01	4,32	2,63	8,87

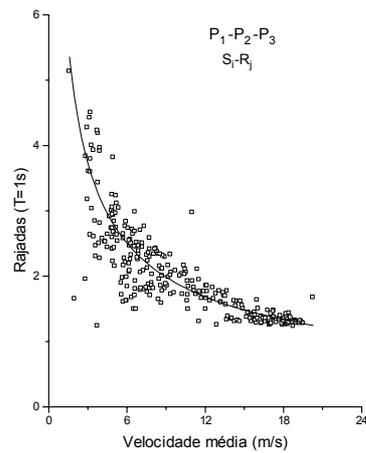


Fig. 5.79: Relação funcional entre velocidade máxima e velocidade média

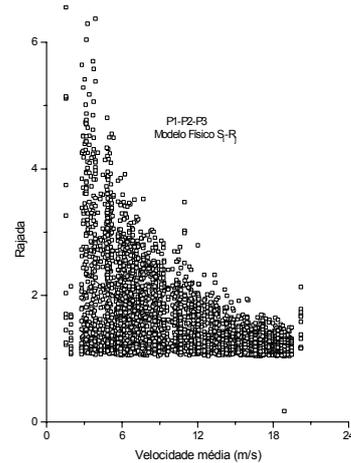


Fig. 5.80: Relação funcional entre rajadas de vento e velocidade média

Na Tabelas 5.10 a 5.12 apresentam-se os parâmetros médios e os desvio padrão obtidos quando determinamos as ordenadas médias constantes na região de baixa frequência dos espectros analisados e a pendente linear obtida por ajuste à expressão potencial negativa para cada posição e grupo analisado.

Tabela 5.10: Parâmetros do espectro proposto simplificado em P_1

Modelo Físico	P_1			
	Ordenada média região de baixa frequência		Pendente linear	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
$S_1-S_2-S_3$	0,088	0,04	-1,559	0,2
$S_4-S_5-S_6$	0,068	0,03	-1,497	0,2
R_3-R_6	0,055	0,01	-1,54	0,3
$S_{ub.i} - R_j$	0,079	0,04	-1,53	0,2
$S_{ub.i}$	0,22	-----	-1,65	-----
R	0,14	-----	-1,38	-----

Tabela 5.11: Parâmetros do espectro proposto simplificado em P_2

Modelo Físico	P_2			
	Ordenada média região de baixa frequência		Pendente linear	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
$S_1-S_2-S_3$	0,164	0,05	-1,47	0,2
$S_4-S_5-S_6$	0,14	0,1	-1,48	0,2
R_3-R_6	0,15	0,05	-1,42	0,2
$S_{ub.i} - R_j$	0,156	0,08	-1,47	0,2
$S_{ub.i}$	0,22	-----	-1,65	-----
R	0,14	-----	-1,38	-----

Tabela 5.12: Parâmetros do espectro proposto simplificado em P_3

Modelo Físico	P_3			
	Ordenada média região de baixa frequência		Pendente linear	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
$S_1-S_2-S_3$	0,206	0,02	-1,55	0,2
$S_4-S_5-S_6$	0,168	0,03	-1,54	0,2
R_3-R_6	0,198	0,03	-1,23	0,6
$S_{ub.i} - R_j$	0,189	0,03	-1,47	0,4
$S_{ub.i}$	0,22	-----	-1,65	-----
R	0,14	-----	-1,83	-----

Na Figura 5.81 apresenta-se o espectro simplificado sugerido para as três posições de medição com pendentes e ordenadas médias de Tabelas 5.10, 5.11 e 5.12.

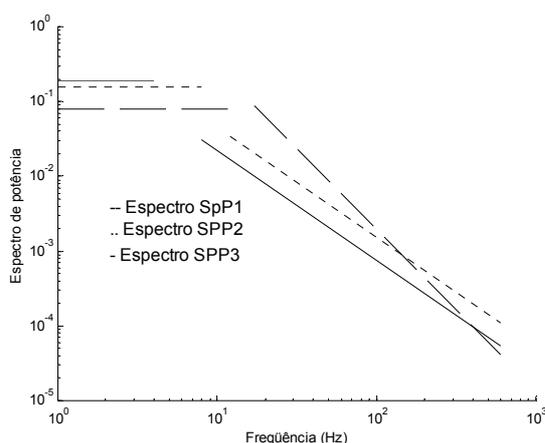


Fig. 5.81: Espectro de velocidades proposto

Finalmente, nas Figuras 5.82 e 5.83 comparam-se valores médios medidos com valores fornecidos por outros pesquisadores, em situações semelhantes. Nos resultados obtidos, verificou-se que o escoamento em centros urbanos é tridimensional e que a direção do vento de fundo influi na determinação do campo de velocidades. Validaram-se a observação de Kato (1992) que as intensidade da turbulência nas imediações da superfície são superiores à propostas por códigos do vento.

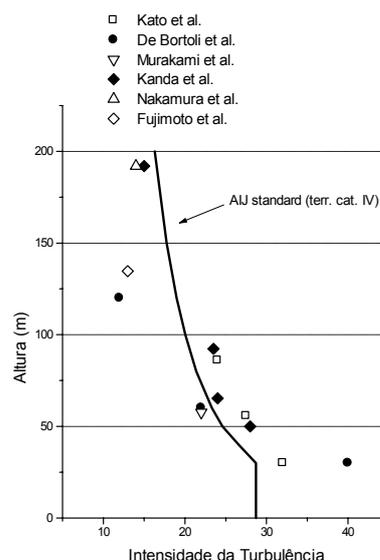
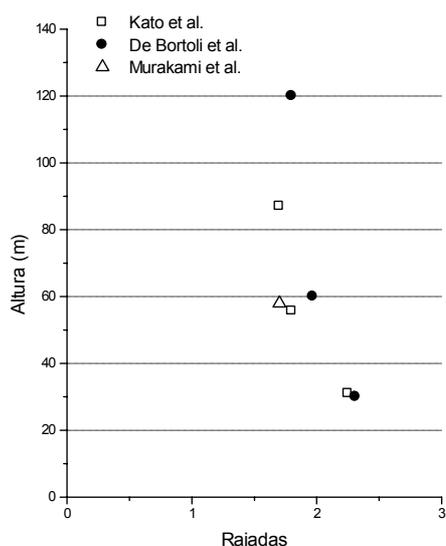


Fig. 5.82: Comparações das rajadas ($T=1s$) Fig. 5.83: Comparações das intensidades da turbulência

O espectro de Al_Jiboori et. al (2001) foi confirmado ao adaptar os conteúdos de energia nos intervalos de altas frequências, sendo modificadas as inclinações dos espectros nesta região. Na parte das frequências baixas somente ocorre uma translação paralela que indica uma variação no módulo, mas não uma modificação em sua distribuição em frequências.

Maruyama et. al (1988) chamaram a atenção com respeito ao escoamento tridimensional na parte inferior, e as dificuldades inerentes às medições do escoamento flutuante. Este fato foi confirmado, mas ampliando a altura até duas vezes a altura média dos obstáculos superficiais. As velocidades médias e flutuantes dependem das dimensões e disposição dos modelos superficiais.

As conclusões de Theurer et. al (1992) foram confirmadas ao aumentar as velocidades médias ao aumentar a densidade superficial em planta (skimming flow), e as perturbações no escoamento médio e flutuante se distribuem até alturas superiores à média da altura dos obstáculos.

Com referência ao trabalho de Peterka e Cermak (1975) ao calcular as escalas integrais da turbulência com as correlações das velocidades flutuantes se verificou que as escalas integrais diminuem ao colocar obstáculos, fato que é coerente com as maiores intensidades de turbulência medida e o corrimento do espectro no intervalo de altas frequências.

6. CONSTRUÇÃO DE MODELO DINÂMICO DE ESTRUTURA ALTA PARA ENSAIO EM TÚNEL DE VENTO

As respostas estruturais obtidas em ensaios dinâmicos em túnel de vento compõem-se de uma componente média (estática) e outra flutuante (dinâmica). Esta última é função da admitância aerodinâmica, que depende unicamente das características geométricas e da admitância mecânica, que incorpora as características dinâmicas de massa, rigidez e amortecimento da estrutura. As estruturas altas são susceptíveis de serem estimuladas com oscilações devidas às componentes flutuantes das forças de arrasto e sustentação originadas pelo vento. Atualmente, os ensaios dinâmicos sobre modelos estruturais em túneis de vento são a ferramenta para obter a informação mais confiável. A turbulência do vento, o desprendimento de vórtices pela separação do escoamento sobre a construção e os efeitos de interferência com outros edifícios de altura semelhante, situados nas cercanias da estrutura em estudo, definem as forças dinâmicas na construção.

Desta maneira, para avaliar teoricamente a carga sobre a estrutura, é necessária a utilização de procedimentos mais sofisticados de análise de carga, que permitam considerar adequadamente a influência das propriedades dinâmicas da estrutura. Devido à dificuldade de considerar todos os parâmetros envolvidos na resposta dinâmica em forma analítica, as técnicas experimentais de medição através de modelos reduzidos em ensaios em túnel de vento, baseadas nas leis de semelhança e similitude (Teoria de Modelos) são dentro as ferramentas disponíveis atualmente as mais confiáveis.

Para que a participação da estrutura na resposta dinâmica à ação do vento seja relevante, é necessário que a excitação provocada pelo vento tenha conteúdo suficiente de energia, na faixa de frequências próximas às frequências naturais relevantes.

Medições do vento atmosférico realizadas em escala natural demonstraram que, para frequências superiores a 1 Hz, a energia contida em rajadas diminui rapidamente, fato que incide favoravelmente posto que permite construir modelos dinâmicos que mantenham a semelhança dinâmica nos primeiros modos de vibração, sem introduzir erros significativos, com materiais disponíveis normalmente no comércio e de relativa simplicidade na manipulação.

Quando uma estrutura é suficientemente rígida, as forças flutuantes são originadas unicamente pela turbulência do vento atmosférico. O método de análise das cargas sobre estruturas muito rígidas parte da suposição de que o movimento da estrutura é desprezível e que as cargas se devem, principalmente, à forma da construção e ao ângulo de incidência do vento. O caráter turbulento do vento origina cargas máximas em correspondência com a chegada simultânea das máximas rajadas contidas no escoamento atmosférico (método quase estático).

Os modelos aerolásticos são projetados para simular as propriedades dinâmicas, nos modos de vibração que contribuem significativamente ao movimento induzido pelo vento. Para edifícios, é comum construir um modelo aerolástico com um recobrimento ou fachada que represente a forma geométrica do edifício. Um sistema estrutural interno equivalente é projetado para modelar as propriedades de massa e a rigidez.

As exigências de semelhança para o estudo das cargas dinâmicas sobre o modelo podem se resumir da seguinte maneira:

1. Semelhança das características do escoamento.
2. Semelhança geométrica da estrutura em uma escala que deve ser quase igual à escala de simulação do vento natural, de maneira que inclua na sua determinação a espessura da camada limite e a escala integral da turbulência.
3. Semelhança das forças aerodinâmicas, relacionadas à igualdade do número de Reynolds.
4. Semelhança das forças inerciais e de rigidez.
5. Semelhança das forças de amortecimento.

A ação do vento, além de apresentar característica aleatória, é, fundamentalmente, uma carga dinâmica. A excitação dinâmica de uma estrutura, na direção longitudinal do vento, ocorre devido às flutuações da velocidade do vento ao redor da sua média. Essas flutuações, chamadas rajadas, ocorrem devido à turbulência atmosférica e têm a capacidade de excitar a resposta dinâmica de um campo limitado de estruturas que apresentam baixo amortecimento e uma frequência natural menor 1Hz.

Para prever a resposta de uma estrutura a um vento turbulento é preciso definir o espectro das cargas induzidas pelas rajadas. Para avaliar a relação entre o espectro das cargas sobre um edifício e o espectro da flutuação de velocidade, é conveniente pensar em termos de comprimento de onda, em lugar de frequências.

A capacidade que uma rajada possui para produzir carga em uma estrutura de grande porte depende principalmente, da relação entre comprimento de onda e a dimensão do edifício. No caso das componentes de alta frequência, esta relação é muito menor que 1, e as pressões produzidas são bem organizadas ou correlacionadas somente sobre áreas pequenas da edificação; o efeito global é desprezível, tornando-se importante nas regiões isoladas. Componente de frequências muito baixas, com uma relação entre comprimento de onda e a dimensão do edifício, igual ou maior que 1, a rajada envolverá toda a estrutura. A comprimento de onda é uma medida linear que indica as dimensões dos redemoinhos que produzem cargas flutuantes, para determinadas alturas, sobre o terreno (ASCE, 1980), e define-se como:

$$\lambda = \bar{V}/f \quad (6.1)$$

sendo f : frequência de incidência das rajadas (Hz), \bar{V} : velocidade média do vento (m/s) e λ : longitude de onda (m).

Assim sendo, para que o redemoinho seja efetivo e origine um campo de pressões completamente desenvolvidas ao redor da edificação, é preciso que ele seja bastante maior do que a edificação (Blessmann, 1990). Portanto, a efetividade da rajada para produzir efeitos dinâmicos sobre o sistema estrutural, dependerá da relação entre as dimensões da edificação e do redemoinho.

Descreve-se, de maneira simplificada, a ação do vento sobre uma estrutura com uma carga estática equivalente, dividindo esta carga em dois termos, uma estática e outra flutuante (dinâmica). A velocidade média do vento é o termo de carga que gera na estrutura efeito estáticos (não considerando as forças aerolásticas no flutter, produzidas para \bar{V} constante), e então, a resposta a esta ação é chamada de resposta média. Admite-se que esta velocidade média se mantenha constante por um intervalo de tempo igual ou superior a 10 minutos, apesar de pequenas variações instantâneas. As flutuações podem produzir oscilações

importantes em estruturas muito flexíveis, principalmente altas e esbeltas, na direção da velocidade média, chamada resposta flutuante. Portanto, a resposta total da estrutura é a superposição da resposta média e flutuante.

Para edificações com frequência fundamental superior a 1 Hz, o termo da resposta flutuante é pouco significativo. Não obstante, para edifícios com frequência fundamental igual ou inferior a 1 Hz, principalmente se eles fossem amortecidos fracamente, este termo poderia representar uma componente significativa da resposta total do sistema.

6.1 MODELOS DINÂMICOS

Em função do grau de semelhança atingido entre modelo e estrutura, os modelos aerolásticos estruturais se classificam em modelos semi-rígidos, modelos aerolásticos de vários graus de liberdade e modelos completos. Os modelos semi-rígidos possuem uma forma modal diferente, com respeito ao protótipo. Este tipo de modelo se utiliza normalmente em estudos em túneis de vento de edifícios altos. Quando o modelo é essencialmente rígido, normalmente determina-se o momento de tombamento produzido pelo vento, na seção de rotação ou de engastamento.

A vantagem fundamental destes modelos é a simplicidade, a rapidez no processo de construção e o seu custo baixo. A desvantagem principal deste tipo de modelo é que este modelo não dá informação da distribuição de cargas de vento com a altura. Esta informação, necessária para calcular a carga de vento estática efetiva para o projeto estrutural, deve estar acompanhada de estudos em modelo de pressão (rígidos) com tomadas de pressão distribuídas na altura.

O análise dinâmica de uma estrutura na forma experimental, permite obter os resultados mais certos e confiável, mediante ensaios em modelos reduzidos em túnel de vento, uma vez implementadas as leis de semelhança cinemática entre o vento atmosférico incidente e o escoamento de ar no túnel e a semelhança dinâmica entre protótipo e modelo (Balendra, 1993).

Os modelos dinâmicos se constroem reproduzindo as propriedades estruturais de rigidez, amortecimento e massa, a partir dos parâmetros adimensionais estabelecidos com critérios da análise dimensional.

Para determinar o comportamento dinâmico de estruturas submetidas à ação do vento, através de ensaios de modelos reduzidos em túnel de vento, devem-se considerar as características dinâmicas dessas estruturas. Essa técnica é chamada “modelagem aerolástico”. Citando Simiu e Scanlan, a aeroelasticidade estuda os fenômenos nos quais as forças aerodinâmicas e os movimentos estruturais interagem significativamente.

No modelo aerolástico deve-se reproduzir as características da estrutura, ou seja, a rigidez, inércia e amortecimento da estrutura, para manter as mesmas formas de vibração que contribuem significativamente à resposta induzida pelo vento. Felizmente, a ação do vento em edifícios altos fica limitada às formas de vibração mais baixas, o qual permite utilizar modelos mais simples para seu estudo.

A carga de vento sobre um modelo é representada, na sua totalidade, quando o vento e a estrutura são totalmente modelados. Neste caso, o modelo responderá da mesma maneira que o teria feito o sistema estrutural, em escala natural. Em alguns casos, permitem-se algumas distorções nos critérios de modelagem, sem que isso provoque perturbações significativas que possam modificar a validade das medições.

Os critérios de modelagem que permitem dar valor aos resultados obtidos em modelos aerolásticos reduzidos submetidos à ação do vento em um túnel de vento, baseiam-se nos produtos adimensionais, mediante a aplicação do teorema de Buckingham, respeitando as leis de semelhança.

Neste trabalho os modelos dinâmicos se construíram de maneira que a balança contribua na massa e a rigidez necessária para verificar que a frequência natural do modelo, à escala de frequência correspondente à simulação do escoamento da capa limite turbulenta, corresponda-se à frequência da estrutura a escala natural.

Assim sendo, considerou-se adequado descrever, em primeiro lugar, as características construtivas da balança e, posteriormente, acrescentar as considerações complementares necessárias para a construção dos modelos dinâmicos.

6.1.1 Construção da Balança

Para determinar as cargas sobre o modelo, foi construída uma balança. Do processamento do sinal obtiveram-se as cargas médias e flutuantes. Medir-se-á o momento de flexão no sentido longitudinal e transversal ao modelo e o momento de torção. Além disso, embora estes esforços tenham sido medidos por outros pesquisadores, estes avaliaram o efeito de interferência de um só modelo ao redor do principal.

Os coeficientes adimensionais do momento de flexão longitudinal, transversal e de torção definem-se como:

$$C_M = \frac{\text{Momento}}{q_{ref} * h_{ref} * A_{ref}} \quad (6.2)$$

sendo $q_{ref} = \frac{1}{2} \rho_{ar} V_{ref}^2$ pressão dinâmica de referência, V_{ref} : velocidade média de referência à altura do modelo em condições de escoamento não perturbado, ρ_{ar} a densidade do ar, A_{ref} = área de referência frontal constante dada pelo produto entre a largura e altura do modelo, h_{ref} = altura de referência e Momento = momento de flexão ou de torção.

A balança consta de quatro partes e se observa na Figura 6.1: célula de carga, constituída por uma barra de seção circular anular de alumínio; sensores de medição, constituídos por extensômetros que geram um sinal analógico proporcional às deformações provocadas pelo vento; instrumentos de aquisição e amplificação do sinal e placa de aquisição A/D que transforma o sinal analógico em digital; e o microcomputador.

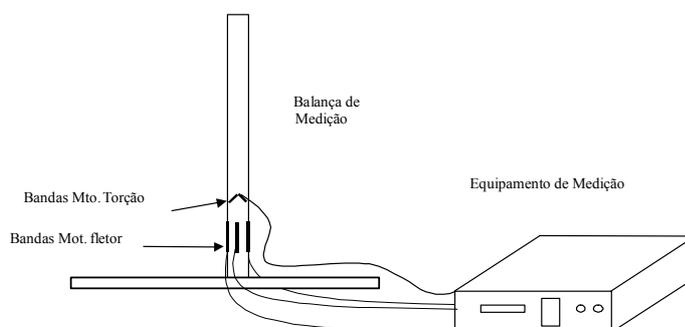


Fig. 6.1: Balança: célula de carga, extensômetros e equipamento de medição

A célula de carga está constituída por uma barra de seção circular anular de alumínio, com uma altura de 155 mm e diâmetro exterior e interior de 20 e 17,2 mm respectivamente.

Como a célula será utilizada para medir deformações flutuantes, deve-se verificar que a admitância mecânica possua uma amplitude de resposta igual à unidade na faixa de frequência de interesse contida no sinal de entrada.

Ao aplicar a equação de equilíbrio dinâmico para sistemas de um grau de liberdade, constituídos por massa e rigidez, com vínculos de apoio engastado - livre, submetidos a vibração livre, a frequência natural se obtém como a raiz quadrada da rigidez do sistema dividida pela massa. A frequência natural finalmente obtida é de 556 Hz.

Cook (1985) mediu variações flutuantes de pressões geradas pelo vento sobre uma estrutura em escala natural, e observou que, para frequências em torno a 1 Hz, o espectro de variações de pressões obtido possui um máximo de energia, em discrepância com o espectro de vento atmosférico, que, para esta faixa de frequências, apresenta uma diminuição sustentada do conteúdo de energia cinética.

Não obstante, ao determinar ações globais dinâmicas, as frequências contidas nas flutuações dos momentos medidos serão menores que as contidas nas flutuações de pressão pelas maiores áreas tributárias. Os códigos de vento supõem que o tempo mínimo que uma rajada do vento deve atuar sobre uma estrutura para que possa desenvolver a carga dinâmica global é de 3 s, tempo que daria uma frequência de 0,33 Hz., frequência que para os fins do trabalho manter-se-á como frequência máxima de interesse. Assim, a frequência de interesse em condições controladas, considerando que a escala de frequência da simulação do escoamento turbulento da camada limite é $E_f=115$, será de 38 Hz. Como a frequência natural da célula de carga é superior ao dobro da frequência de interesse (76 Hz), o módulo de recepção/admissão mecânica da célula de carga para esta faixa de frequências será igual à unidade, mantendo no sinal de saída as flutuações sem desvios das variações dinâmicas provocadas pelo vento.

Para analisar os momentos de flexão na base e de torção, os sensores que utilizam-se são extensômetros. Os extensômetros estão constituídos por um suporte plástico com uma resistência elétrica colada em uma das suas faces.

Como o sensor está intimamente aderido ao material que suporta o esforço a medir, a deformação experimentada pelo material se comunica ao condutor elétrico através da adesão. Assim, o extensômetro permite converter o problema de medir deformações em um problema de medir resistência elétrica. Para resolver o problema de medir variações de resistência, o método utilizado é por meio da ponte de Wheatstone.

O Equipamento de Aquisição é um 2100 System Strain Gage Conditioner and Amplifier System. As partes que o constituem são:

- a. Strain Gage Conditions
- b. Power Supply Module
- c. Digital Display

O Módulo Série 2100 compreende um sistema de multi-canais para gerar sinais provenientes do extensômetro. No interior, tem incorporado a ponte de Wheatstone, que mede as variações de resistência através da diferença de potencial elétrico. O sinal gerado pode ser visualizado numa tela ou registrado em um equipamento externo, para o seu posterior processamento. A faixa de resposta do equipamento de medição de variações de resistência estende-se a 15 kHz, valor sensivelmente maior que o requerido como frequência de interesse, permitindo assim obter um sinal flutuante sem que se introduza filtrado físico nas flutuações de altas frequências.

Os esforços a medir são: momentos de flexão longitudinal (Y) e transversal (X) ao modelo. Se uma viga é exposta a esforço de flexão e simultaneamente geram-se esforços cortantes, denomina-se o fenômeno de flexão simples. A distribuição de tensões provocada pela ação do momento de flexão, em uma seção transversal, de acordo com a equação de Navier é linear, gerando-se também na mesma seção transversal, as tensões causadas pelos esforços cortantes.

O conceito físico de funcionamento se baseia no esquema mostrado na Figura 6.2, onde se observa a distribuição de tensões produzidas pelo esforço de flexão e cortante em uma seção transversal da balança. Como os extensômetros estão aderidos ao bordo exterior da barra, os

únicos esforços presentes são os provenientes da flexão, e a direção das faixas coincide com a direção principal de tensões.

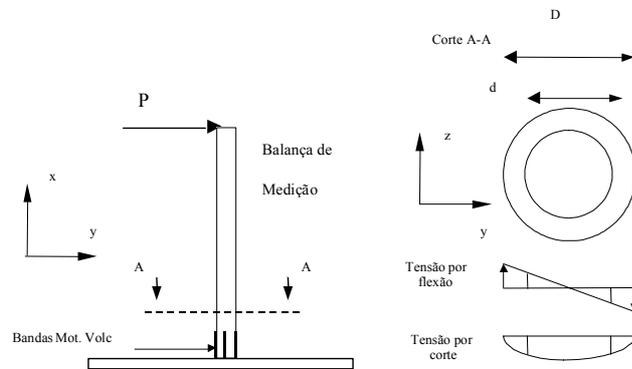


Fig. 6.2: Esquema físico para medir o momento de flexão longitudinal (Y) e transversal (X) ao modelo

A disposição dos sensores para medir as deformações produzidas por torção é a seguinte e se observa na Figura 6.3.

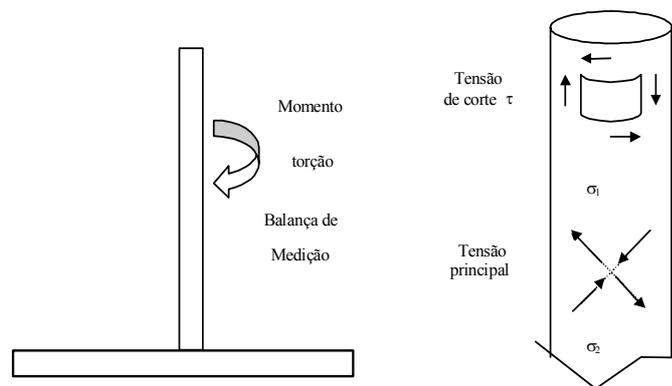


Fig. 6.3: Distribuição das tensões produzidas pelo momento de torção

Ao representar as tensões no círculo de Mohor, conclui-se que as tensões principais de tração e compressão têm o valor da tensão de corte e estão em uma direção de 45° com respeito ao eixo do cilindro. Assim sendo, os extensômetros se situam a 45° com relação ao eixo longitudinal da célula de carga, na mesma seção transversal. Na Figura 6.4 se apresenta a balança construída.



Fig. 6.4: Balança com extensômetro para medir os momentos.

Para a aquisição e digitalização do sinal flutuante analógico gerado pelos sensores e medidos pelo equipamento de medição, é necessário verificar a capacidade de resposta do equipamento de aquisição. Como a frequência de interesse em condições controladas definiu-se em 38 Hz, para que no processo de digitalização não se introduzam erros, é necessário garantir que a frequência de aquisição seja superior em duas vezes à frequência limite de interesse. Se se omite esta situação, ao realizar a digitalização do sinal analógico, introduz-se uma distorção conhecida como “aliasing” na série numérica que, ao aplicar a transformada rápida de Fourier, translada-se ao espectro. Desta forma, a frequência de aquisição deverá ser $f_a \geq 76\text{Hz}$.

A placa de aquisição conversora analógica digital é PCI-DAS 1602/16, com 16 canais simples e uma capacidade de amostras de 200 kHz. Como esta frequência é sensivelmente maior à requerida como frequência de aquisição, não se introduzirão perturbações ao converter o sinal analógico em digital, logrando assim a reconstrução das flutuações contidas no sinal provocadas pelas rajadas de alta frequência (Figura 6.5).

Para descrever o comportamento de uma variável aleatória temporal mediante parâmetros estatísticos médios obtidos de amostras, é necessário dispor de registros que sejam representativos do fenômeno a analisar. Esta condição exige que, para determinar o valor médio correspondente aos coeficientes de momento de flexão e de torção, a amostra seja suficientemente extensa para que o evento se reproduza em várias oportunidades.

Desta maneira, como os valores médios de cargas são provocados pela estrutura turbulenta do vento contida no espectro micrometeorológico do espectro de Van der Hoven e para um tempo de amostras de 10 minutos apresenta um conteúdo mínimo de flutuações, com uma variação aproximadamente constante em um intervalo de tempo compreendido entre 10 minutos e uma hora, permite que, com amostras desta duração os valores médios permaneçam estáveis e possam ser considerados como representativos do evento.

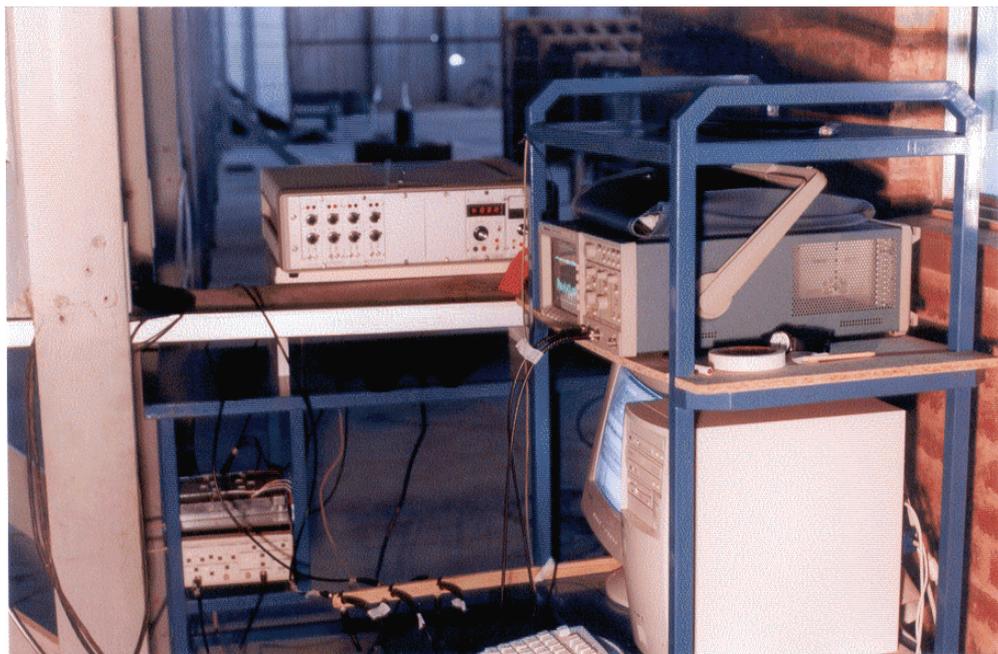


Fig. 6.5: Equipamento de aquisição da variação temporal da resposta

Ao dispor na simulação de uma escala de tempo $E_T = \frac{1}{115}$ em situação controlada, com amostras de 6 segundos, representariam em escala natural, o evento de 10 minutos. Com amostras obtidas com uma frequência de aquisição de 1000 Hz, implicaria amostras de 4800 valores por cada evento. Como a capacidade da placa de aquisição é superior aos 200000 valores, a capacidade da placa para os três canais de aquisição, durante o evento dinâmico, contemplaria até 13 eventos por variável aleatória analisada.

6.1.2 Condições de semelhança

As leis de semelhança permitem transladar as medições obtidas quando observarmos um fenômeno físico em um sistema S_a (sistema de modelo) a outro sistema S_a' (sistema natural),

em escala diferente. O conceito de semelhança, para o caso de ensaios dinâmicos em túnel de vento, não se vincula somente às dimensões geométricas, compreende também outras quantidades físicas, como tempo, aceleração, força, frequência, etc.

Quando as leis matemáticas que regem o comportamento físico estudado são conhecidas, os resultados podem ser transferidos do modelo ao protótipo em forma direta, sempre que a hipótese de cálculo tenha validade para os dois sistemas. Quando estas leis não são conhecidas, é possível extrapolar ao protótipo os resultados obtidos no modelo, através da análise dimensional. Para isto, devem ser identificadas todas as quantidades físicas que regem o problema em estudo.

A análise dimensional não determina o tipo ou número de condições necessárias para estabelecer as leis de semelhança. A escolha dos parâmetros físicos considerados determinantes no fenômeno, realiza-se a critério do pesquisador. As leis de semelhança que se devem cumprir, para que os resultados obtidos em um ensaio estrutural dinâmico sobre um modelo em escala reduzida em túnel de vento possam ser aplicados a uma estrutura em escala natural são: semelhança geométrica, cinemática e dinâmica.

A condição de semelhança geométrica entre modelo e protótipo relaciona as formas e as dimensões geométricas do modelo e da estrutura. Todas as dimensões geométricas devem estar linearmente relacionadas. “Formas geométricas” referem-se àquelas formas susceptíveis de introduzir modificações no campo aerodinâmico em cercanias do modelo, de maneira que influa ou modifique os esforços medidos sobre esse modelo.

Assim, a relação entre dimensões no modelo e no protótipo é constante sendo chamada *escala geométrica* do modelo.

$$E_G = \frac{L_m}{L_p} \quad (6.3)$$

A semelhança cinemática estabelece que o campo de velocidades em pontos homólogos, entre modelo e estrutura, deverá ser semelhante. Para que esta condição possa ser satisfeita, devem se cumprir duas condições simultaneamente:

-
- A estrutura do escoamento turbulento incidente sobre o modelo deverá ser semelhante à estrutura do vento atmosférico, aspecto apresentado na Seção 2.3.
 - A condição de semelhança do escoamento incidente junto com a semelhança geométrica entre modelo e estrutura original, para cada direção de vento incidente, um campo de velocidade na vizinhança do modelo de maneira que a pontos homólogos entre modelo e estrutura correspondam velocidades semelhantes.

As leis de semelhança geométrica e cinemática em ensaios estruturais em túnel de vento não são independentes. Para simular os efeitos do vento sobre edifícios e estruturas, por meio de modelos, é preciso que as propriedades da camada limite atmosférica sejam modeladas em escala linear pelo mesmo fator de escala do modelo do edifício. Isto é, a escala geométrica utilizada para modelar a estrutura deve ser aproximadamente igual à escala de comprimento de onda do vento simulado. Cook (1977) propõe um procedimento para determinar o fator de escala de uma simulação de vento natural em um túnel de vento, no qual intervêm como variáveis, entre outras, a espessura da camada limite simulada, a forma dos perfis de velocidades médias e as escalas integrais de turbulência. A escala de simulação, determinada desta maneira, e utilizada como escala geométrica para a construção do modelo, manterá a similitude das variações espaciais e temporais das pressões flutuantes originadas pelo escoamento turbulento, medidas sobre o modelo e sobre a estrutura.

A relação entre velocidade do fluxo em volta do modelo e protótipo deve permanecer constante. Esta constante se denomina escala de velocidades.

$$E_v = \frac{V_m}{V_p} \quad (6.4)$$

Sendo V_m : velocidade do escoamento no modelo e V_p velocidade do vento natural.

A semelhança dinâmica supõe que a estrutura e o modelo sejam geometricamente semelhantes e estejam situados com a mesma orientação a respeito da direção média do escoamento de vento incidente. O escoamento em cercanias do modelo será semelhante ao escoamento do protótipo se a relação de todas as forças atuando sobre a partícula de fluido no vento simulado e no vento natural permaneçam constantes.

Os produtos adimensionais que relacionam as forças são:

Número de Cauchy, ou distribuição de rigidez; relação entre as forças de inércia do escoamento e de rigidez do material estrutural:

$$\pi_j = \frac{\rho_{am} V_m^2}{E_m} = \frac{\rho_{ap} V_p^2}{E_p} \quad (6.5)$$

Sendo ρ_{am} e ρ_{ap} : densidade do ar no modelo e no protótipo; E_m e E_p : módulo de elasticidade do material do modelo e do protótipo. Como geralmente o fluido utilizado no ensaio é ar em temperatura e pressão atmosférica, dá-se que $\rho_{am} = \rho_{ap}$, resultando a igualdade anterior em

$$E_m = E_p E_v^2 \quad (6.6)$$

Se variarmos o quadrado da escala de velocidade, é possível manter a condição de semelhança, construindo o modelo com um material diferente daquele do protótipo.

O amortecimento estrutural, ou relação entre as forças estruturais dissipativas e as forças de inércia do escoamento, deverá manter-se constante no modelo e protótipo.

$$\xi_m = \xi_p \quad (6.7)$$

Relação de massas específicas

$$\left[\frac{\rho_m}{\rho_a} \right]_m = \left[\frac{\rho_m}{\rho_a} \right]_p \quad (6.8)$$

Onde ρ_m é a densidade do material do modelo ou do protótipo

Número de Strouhal

O Número de Strouhal associa-se, frequentemente, à configuração do escoamento sobre uma estrutura, como poderiam ser os vórtices “shedding”, definidos como:

$$\pi_j = n_p \frac{L_p}{V_p} = n_m \frac{L_m}{V_m} \quad (6.9)$$

Nesse caso, n seria a frequência de desprendimento dos vórtices, L a largura da estrutura e V a velocidade média do vento. A partir do número de Strouhal, pode-se determinar a frequência de vibração do modelo,

$$n_m = n_p \frac{V_m}{V_p} \frac{L_p}{L_m} = n_p \frac{E_V}{E_G} \quad (6.10)$$

A frequência de vibração do modelo pode modificar-se mudando a escala de velocidade. Além disso, pode-se verificar que:

$$n_m = n_p \frac{E_V}{E_G} = \frac{n_p}{E_G} \sqrt{\frac{E_m}{E_p}} \quad (6.11)$$

Este último desenvolvimento é válido se respeitamos a relação,

$$\pi_j = \frac{\rho_{am}}{\rho_{ap}} = \frac{\rho_{mm}}{\rho_{mp}} = cte \quad (6.12)$$

Como $\rho_{am} = \rho_{ap}$, o valor $\pi_j = 1$ implica que a densidade do material do modelo deva ser igual à densidade do material do protótipo, $\rho_{mm} = \rho_{mp}$.

Número de Reynolds

O número de Reynolds relaciona as forças inerciais e as viscosas do escoamento

$$R_e = \left[\frac{V \rho_a D}{\mu} \right]_p = \left[\frac{V \rho_a D}{\mu} \right]_m = \pi_j = cte \quad (6.13)$$

Como $\mu_{am} = \mu_{ap}$ e $\rho_{am} = \rho_{ap}$ posto que nos dois casos o fluido é idêntico (ar) à pressão e temperatura atmosférica, deduz-se que, para manter constante o produto adimensional, deve-se cumprir que

$$V_m = V_p \frac{L_p}{L_m} = V_p \frac{1}{E_G} \quad (6.14)$$

Outra relação que vincula a velocidade do escoamento no modelo com a escala geométrica, pode-se obter por meio do número de Froude:

$$\pi_j = \left[\frac{V^2}{g L} \right]_p = \left[\frac{V^2}{g L} \right]_m \quad (6.15)$$

Como $g_p = g_m$, para que o produto adimensional se mantenha constante deve-se cumprir que

$$V_m = V_p \sqrt{\frac{L_m}{L_p}} = V_p \sqrt{E_G} \quad (6.16)$$

Das condições impostas pelos números adimensionais (6.14) e (6.16) deduz-se que a única maneira de cumprir com as duas condições é que a escala geométrica seja igual à unidade ($E_G = 1$).

Como este requerimento implica realizar um modelo de dimensões iguais às do protótipo, para poder realizar um estudo sobre um modelo reduzido, é preciso deixar de considerar estritamente a exigência imposta pelo teorema de Buckingham, de manter constantes os dois produtos adimensionais (Reynolds e Froude). Para isso, dever-se-ia voltar às (6.13) e (6.15) e revisar, em função da variável dependente adotada, qual é a variável considerada anteriormente como independente que poderia ser excluída sem introduzir uma modificação sensível na variável a ser determinada.

Para o caso de ensaios estruturais sobre modelos aerolásticos reduzidos, de edifícios ou de torres de grande altura em túnel de vento, as forças da gravidade não são suportadas pelo vento; portanto, manter constante a relação imposta pelo número de Froude, em modelo e protótipo não tem importância.

Uma estrita modelagem das propriedades elásticas da estrutura não é necessária em ensaios estruturais dinâmicos nas formas de vibração para as quais a ação do vento é importante.

Para uma torre ou construção na qual a forma de resistência é principalmente a forma de flexão ou torção, o critério de parâmetro de rigidez pode ser modificado à partir de

$\frac{E}{\rho V^2} = cte$ em $\frac{EI}{\rho V^2 L^4} = cte$, o em $\frac{GJ}{\rho V^2 L^4} = cte$, onde EI o GJ são as rigidezes de flexão e torção, respectivamente.

Para uma relação $E_\rho = 1$, a relação anterior pode ser expressa como:

$$E_E E_I = E_G E_J = E_G^4 E_V^2 \quad (6.17)$$

A distribuição de massa no modelo pode ser aproximada ao protótipo de várias maneiras. Se as densidades do ar em escala natural e modelo são a mesma, para manter constante a relação das forças de inércia no modelo e estrutura, a densidade do material deve ser a mesma, isto é $E_\rho = 1$. Normalmente não é necessário manter a densidade exata em todos os pontos do modelo sempre que a massa que afeta ao movimento modal considerado for corretamente escalada. Para estruturas lineares (de grande altura e esbeltas) é suficiente “escalar” a massa por unidade de comprimento, isto é, a correta distribuição da massa pode ser substituída pela correta distribuição do momento de inércia da massa com respeito ao eixo em torno do qual pode ocorrer a rotação.

Para uma construção alta, a forma fundamental de deslizamento é uma combinação de corte e flexão, e pode ser aproximada por uma linha reta.

6.1.3 Construção dos modelos dinâmicos

Os modelos foram construídos em uma escala geométrica de 1:300. Esta escala foi adotada para manter a escala geométrica igual à escala de simulação do vento natural. Para modelar a estrutura foi necessário adotar, em primeiro lugar, uma construção em escala natural susceptível de ser modelada. As dimensões dos modelos a ensaiar determinaram-se em função das dimensões características das estruturas construídas no ambiente a reproduzir.

Do processamento das dimensões das estruturas construídas, adotaram-se, como modelos, estruturas prismáticas retangulares, com base e profundidade iguais às dimensões médias das estruturas reais da cidade de Buenos Aires e com uma altura igual, duas e quatro vezes o valor médio respectivamente. As dimensões dos modelos utilizados são apresentadas na tabela 6.1:

Tabela 6.1: Dimensões dos modelos

Modelo	Largura (B) m		Profundidade (P) m		Altura (H) m	
	Modelo	Protótipo	Modelo	Protótipo	Modelo	Protótipo
2	0,07	21	0,09	27	0,20	60
3	0,07	21	0,09	27	0,40	120

A forma fundamental de vibração de edifícios altos cujas deformações são combinações de corte e flexão, pode ser aproximada por uma linha reta. Nos termos de modelagem aerodinâmica, não é tão relevante como essa forma é atingida, sempre que se verifique que as frequências de vibração concordam com a escala de simulação.

Para determinar a frequência fundamental de maneira aproximada de uma estrutura alta, de forma regular e constante com a altura, com distribuição de massa uniforme, estrutura aporticada de concreto sem cortinas, foi utilizada a seguinte equação (Blessmann, 1998):

$$f = \frac{1}{0,05 + 0,015H} \quad (6.18)$$

sendo H a altura em metros e f a frequência natural em Hz. Como valor aproximado do amortecimento natural, adotou-se $\xi = 0,020$ considerado um estimativo do valor médio.

Para que seja suficiente para ser percebida pela sensibilidade do instrumental utilizado, a escala de velocidade será a máxima possível de atingir. Assim sendo, as escalas de velocidade e frequência se mantiveram nos valores obtidos no capítulo 5.

A forma do modo fundamental de vibração correspondente às estruturas altas adotadas, neste caso essa forma é a de uma viga engastada – livre, e a rigidez se expressa como:

$$K_M = \frac{3E_M I_M}{L_M^3} \quad (6.19)$$

O momento de inércia da seção circular anular é:

$$I_M = \frac{\pi(D_{eM}^4 - D_{iM}^4)}{64} \quad (6.20)$$

A frequência do primer modo de vibração se determina como:

$$f_M = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_M}{m_M}} \quad (6.21)$$

O modelo utilizado foi construído no Laboratório de Aerodinâmica. Utilizo-se chapas de MDF de espessura de 3mm não estrutural, para a construção das paredes externas e o teto, aportando, desta maneira, à similitude geométrica (Figuras 6.6 e 6.7). As dimensões transversais são coincidentes e iguais às médias obtidas do análise das fotos aéreas.

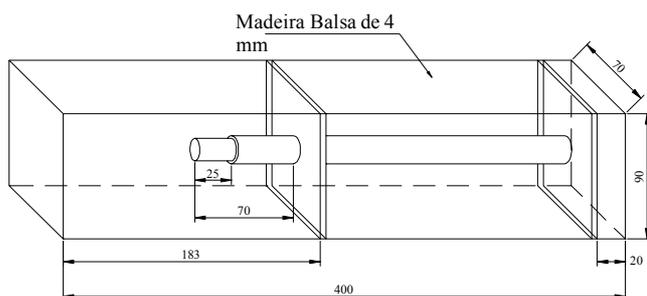


Fig. 6.6: Modelo 3 (120 m em protótipo)

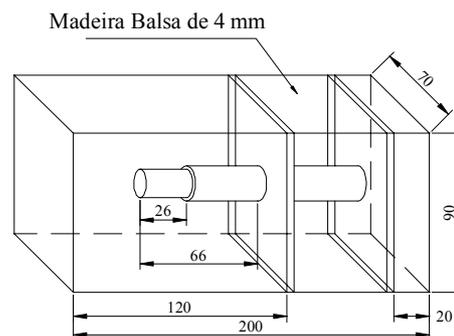


Fig. 6.7: Modelo 2 (60 m em protótipo)

Internamente e para satisfazer as condições impostas pelas leis de semelhança dinâmica, utilizou-se o cano da balança para aportar a rigidez e completar a massa necessária (Figuras 6.8 e 6.9). Assim sendo podem ser considerados para o cálculo da frequência natural os valores de densidade e o módulo de elasticidade de $\rho_m = 0,27 * 10^4 \text{ kg} / \text{m}^3$ e $E = 69 * 10^9 \text{ N} / \text{m}^2$.

O processo de calibração do modelo se inicia com a verificação da frequência, devido a que, dessa maneira, constata-se simultaneamente a condição de rigidez e distribuição da massa.

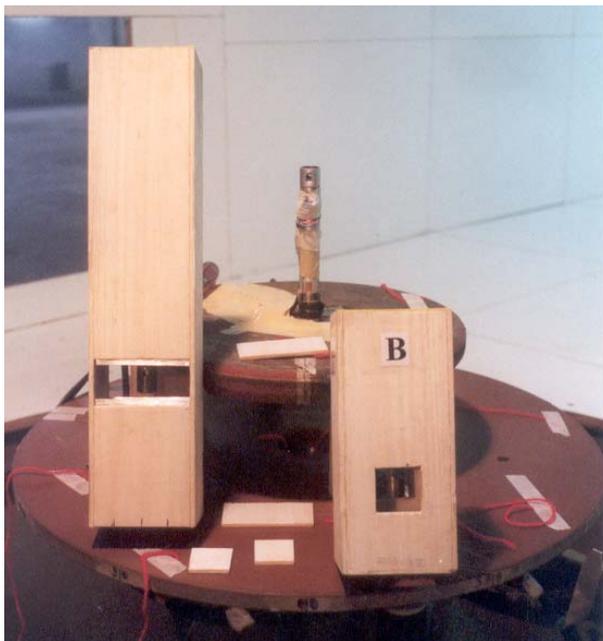


Fig. 6.8: Modelos dinâmicos de 40 e 20 cm respectivamente



Fig. 6.9: Modelos dinâmicos de 20 cm com balança

Na tabela 6.2, apresentam-se os valores de frequências do protótipo e modelo afetados pelas escalas correspondentes.

Tabela 6.2: Frequências do protótipo e modelo

Modelo	Amortecimento estrutural (ξ)		Peso (kg)	Frequência de Vibração modo Fundamental (Hz)		
	Modelo	Protótipo		Protótipo	Modelo	Modelo (cálculo)
2	0,020	0,020	0,112	1,05	116	100
3	0,020	0,020	0,165	0,54	54	53,3

A frequência natural, bem como o amortecimento estrutural, verificarem-se a partir dos registros do sinal gerados pelas bandas extensométricas e os acelerômetros montados na parte superior do modelo. Para provocar uma excitação do sistema em condição de vibrações livres amortecidas, a carga aplicada foi do tipo Delta de Dirac.

A freqüência de aquisição do sinal correspondente foi de 10000 Hz, durante um tempo de 6 segundos de duração, totalizando 60000 pontos. As freqüências foram calculadas diretamente por meio do espectro de potência através do programa comercial Matlab 5.3. O amortecimento estrutural foi estimado por meio do decremento logarítmico δ definido como o quociente entre duas amplitudes separadas por p amplitudes,

$$\frac{X_{k+p}}{X_k} = e^{-2p\pi\xi} \quad (6.22)$$

e finalmente resulta

$$\xi = -2p\pi \ln \frac{X_{k+p}}{X_k} \quad (6.23)$$

Para verificar a confiabilidade do sensor dos extensômetros, na parte superior se colocou um acelerômetro. Nas Figuras 6.10 e 6.11 se apresentam as flutuações do sinal elétrico no tempo, para excitações em torno do eixo X correspondente ao modelo 3, do acelerômetro e extensômetros respectivamente.

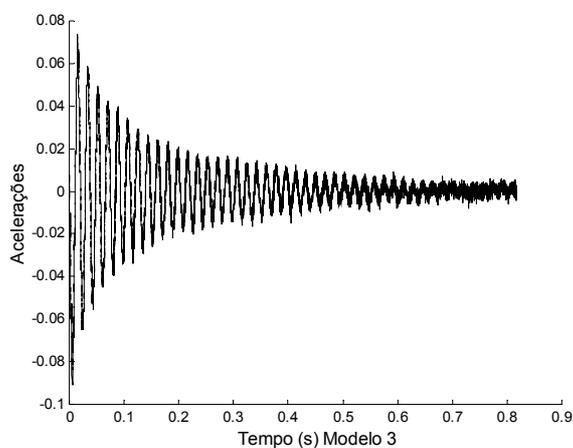


Fig. 6.10: Diagrama aceleração-tempo em vibração livres

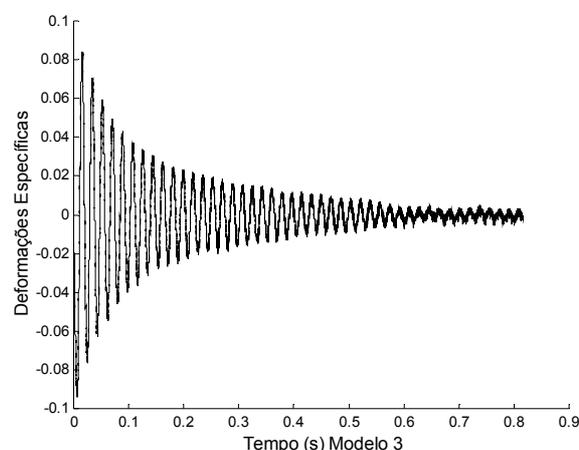


Fig. 6.11: Diagrama def. esp.-tempo em vibração livres

Nas Figuras 6.12 e 6.13 se apresentam os espectros de potência dos respectivos sinais, obtendo a freqüência do modo fundamental.

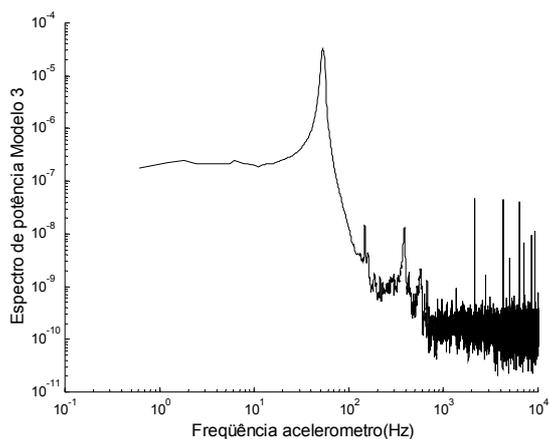


Fig. 6.12: Espectro de potência da resposta do acelerômetro

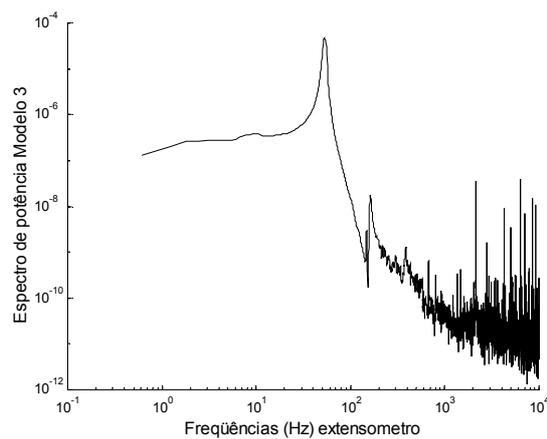


Fig. 6.13: Espectro de potência da resposta do extensômetro

Nas Figuras 6.14 e 6.15 se apresentam a flutuação do sinal elétrico no tempo, para excitações em torno do eixo X correspondente ao modelo 2, do acelerômetro e extensômetros respectivamente.

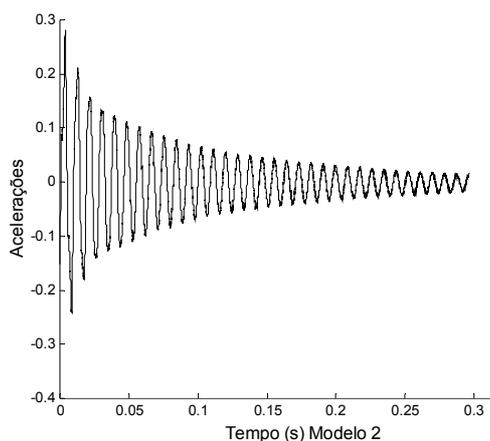


Fig. 6.14: Diagrama aceleração-tempo em vibração livres

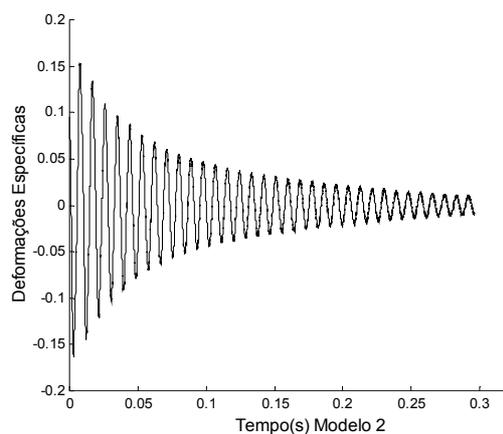


Fig. 6.15: Diagrama def. esp.-tempo em vibração livres

Nas Figuras 6.16 e 6.17 se apresentam os espectros de potência obtendo a frequência do modo fundamental.

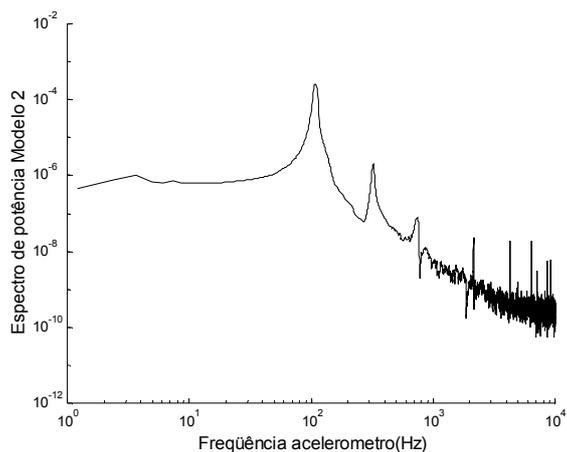


Fig. 6.16: Espectro de potência da resposta do acelerômetro

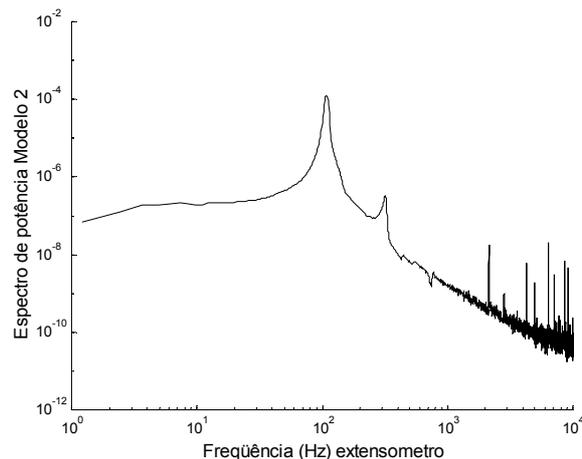


Fig. 6.17: Espectro de potência da resposta do extensômetro

Do processamento finalmente obteve-se as frequências da tabela 6.3:

Tabela 6.3: Frequência fundamental dos modelos

Modelo	Característica dos Modelos	
	f_M (Hz.)	ξ_M
2	64	0,020
3	125	0,020

7. DETERMINAÇÃO DAS CARGAS EM ESTRUTURAS ALTAS, SEGUNDO CÓDIGOS DE VENTO.

A ação do vento sobre as construções foi avaliada por meio da medição de esforços sobre modelos reduzidos em túnel de vento, determinados em condições de escoamento uniforme e deixando de lado efeitos dinâmicos da turbulência atmosférica.

Um dos métodos mais difundidos para o cálculo de estruturas expostas à ação do vento, é aquele proposto por Scrutton e Newberry; levam em conta o efeito das rajadas, mas sem considerar as propriedades dinâmicas da estrutura em estudo, e são aplicáveis somente quando a frequência fundamental é alta. Depois, Alan G. Davenport e Vickery ampliam o método de análise admitindo que a resposta de estruturas elásticas na direção do vento, obtém-se por meio da descrição estatística da turbulência atmosférica. Não obstante os melhoramentos introduzidos por Davenport na avaliação da resposta dinâmica, mantém-se a limitação de tomar em conta a resposta longitudinal estatisticamente independente da resposta transversal ao fluxo médio (não correlacionadas).

Os códigos de vento partem geralmente da premissa que, embora as cargas de vento sejam de natureza dinâmica, as suas características são tais que na maioria das edificações poderiam ser tratadas como se fossem estruturas rígidas. No caso de edificações habituais, com período fundamental de vibração $f > 1Hz$. ou menos e amortecimento de 1% do crítico ou maior, o análise estrutural pode se basear no método estático de referência. As vantagens deste método são: a sua simplicidade, uma correlação razoável entre as suas predições e valores reais e a afirmação de que a maioria das construções se comportam como se fossem rígidas.

A tendência atual é de construir edifícios altos e leves, mais sensíveis às vibrações estruturais induzidas pelo vento e com amortecimento menor que nas estruturas tradicionais. A turbulência do vento, o deslocamento de vórtices pela separação do escoamento sobre a construção e os efeitos de interferência com outros edifícios de altura semelhante, situados na cercanias da estrutura em estudo, constituem causas fundamentais que provocam as forças dinâmicas. Assim sendo, é necessária a utilização de procedimentos sofisticados de análise de carga que permitam tomar conta, adequadamente, da influência das propriedades dinâmicas da estrutura.

Nas últimas décadas, as normas de vento tiveram que incorporar procedimentos para a valoração das cargas, levando em conta os efeitos dinâmicos provocados pelo vento. Esta abordagem foi incorporada, primeiramente, às Normas Canadenses e às Normas Australianas, no início dos anos 70 (N. J. Cook) e depois à Norma Argentina de ventos CIRSOC 102 (J. Blessmann, J. D. Riera) nos anos 80.

Os primeiros estudos matemáticos para cálculo da resposta longitudinal, devida aos efeitos do vento, foram desenvolvidos na década de 1960 por Davenport e Vickery. Os métodos que utilizam considerações de correlação espectral e espacial para a predição da resposta na direção do vento avançaram muito atualmente, de maneira que o método do fator de rajada é incorporado e utilizado em diferentes normas.

Neste capítulo, apresentam-se as cargas provocadas pelo vento sobre as estruturas adotadas, obtidas da norma Brasileira e Argentina, para condições de exposição semelhantes às utilizadas neste trabalho e descritas nos códigos de vento.

7.1 NORMA BRASILEIRA NBR 6123 (NB – 599) 1987.

7.1.1 Método simplificado. Dados de ingresso para o cálculo.

A velocidade de projeto \bar{V}_p corresponde à velocidade média sobre períodos de 10 minutos a 10 m de altura do solo, em terreno de categoria II (campo aberto); obtém-se através do produto:

$$\bar{V}_p = 0,69VS_1S_3 \quad (7.1)$$

sendo:

V : Velocidade de rajada de 3 segundos em m/s a 10 m sobre o terreno para categoria de exposição C e associada a uma probabilidade de ocorrência anual de 0,02. Devido que a estrutura que se adota como característica possui dimensões correspondentes às médias estatísticas de estruturas construídas na cidade de Buenos Aires, e os ensaios realizados no túnel recriaram o ambiente urbano correspondente a essa cidade, com a finalidade de

comparar, adota-se a velocidade básica do regulamento argentino de ventos correspondente a Buenos Aires.

Como a velocidade básica foi determinada como a velocidade flutuante média em um intervalo de tempo, altura de terreno, categoria de exposição e nível de probabilidade semelhante àquela do Brasil, a conversão à velocidade de projeto deve manter-se como indica a norma NBR 6123.

S_1 : Fator topográfico que toma conta das variações do relevo do terreno que, no caso do terreno natural plano analisado, é igual à unidade.

S_3 : Fator estatístico que depende dos níveis de probabilidade e período de exposição da estrutura, que, no caso analisado corresponde ao Grupo 2 da norma, e igual à unidade.

A pressão dinâmica de cálculo variável com a altura, aplicando o método simplificado origina:

$$q(z) = \bar{q}_0 b^2 \left[\left(\frac{z}{z_r} \right)^{2p} + \left(\frac{h}{z_r} \right)^p \left(\frac{z}{h} \right)^\gamma \frac{1+2\gamma}{1+\gamma+p} \zeta \right] \quad (7.2)$$

O primeiro termo, dentro do colchete, corresponde à resposta média, e o segundo representa a largura máxima da resposta flutuante, sendo:

$$\bar{q}_0 = 0,613 \bar{V}_p^2 \quad (7.3)$$

com \bar{q}_0 em N/m^2 e \bar{V}_p em m/s .

O expoente p e o coeficiente b dependem da rugosidade do terreno (Tabela 20) e γ do tipo de construção (Tabela 19).

O fator de amplificação dinâmica ζ se obtém das figuras 14 a 18, correspondentes às cinco categorias de terreno que estão no regulamento, em função das dimensões da construção, do amortecimento estrutural ξ e da frequência natural, correspondente à primeiro modo de vibração. Estes dois últimos valores se determinam de acordo com o procedimento especificado na Tabela 19.

Com estes valores, o momento de flexão de desenho na base e a força resultante que agem sobre a estrutura, calculam-se com as equações 7.4 e 7.5, e se apresentam na Tabela 7.1:

$$Md_{Base} = \sum M_i(z) = q_i(z)A_i(z)Ca_i h_i \quad (7.4)$$

$$Fd = \sum F_i(z) = q_i(z)A_i(z)Ca_i \quad (7.5)$$

Sendo: Md_{Base} : momento de flexão de desenho na base da estrutura

$M_i(z)$: momento de flexão na base da faixa correspondente à coordenada i

$q_i(z)$: pressão dinâmica de cálculo variável com a altura correspondente à altura do baricentro da coordenada i

$A_i(z)$: área de referência da coordenada i

Ca_i : coeficiente de arrasto correspondente à coordenada i

h_i : altura da coordenada i

Fd : A força total de desenho sobre as estruturas resulta

$F_i(z)$: força correspondente à coordenada i

Tabela 7.1: Estrutura 3. Força e momento de flexão sobre protótipo dinâmico (NBR 6123)

h (m)	$q_i(z)$	$A_i(z)$ (m^2)	Ca_i	$F_i(z)$ (KN)	h_i (m)	$M_i(z)$ (KNm)
10	487,0961	210	1,35	138	5	690
	487,0961			0		0
20	593,0762	210	1,35	168	15	2522
	699,0563			0		0
30	792,5854	210	1,35	225	25	5617
	886,1146			0		0
40	974,6701	210	1,35	276	35	9671
	1063,226			0		0
50	1149,34	210	1,35	326	45	14663
	1235,454			0		0
60	1320,286	210	1,35	374	55	20587
	1405,118			0		0
80	1573,15	420	1,35	892	70	62438
	1741,183			0		0
90	1824,972	210	1,35	517	85	43977
	1908,762			0		0
100	1992,625	210	1,35	565	95	53666
	2076,487			0		0
120	2244,796	420	1,35	1273	110	1,4E+05
	2413,105					

A força de projeto do protótipo 3 de 120 m de altura $Fd(p3)$ resulta $Fd(p3) = 4754 \text{ KN}$ e o momento de projeto total, na base do protótipo $Md_{Base}(p3)$, no sentido longitudinal do escoamento médio $Md_{Base}(p3) = 3,54 \cdot 10^5 \text{ KNm}$.

Para transferir a carga do protótipo ao modelo, mantendo as leis de semelhança resulta:

$$Md_{Base}(m3) = Md_{Base}(p3) \frac{E_f^2}{E_G^2} = 1,76 \text{ Nm} \quad (7.6)$$

$$Fd(m3) = Fd(p3) \frac{E_f^2}{E_G^4} = 7,10 \text{ N} \quad (7.7)$$

Tabela 7.2: Estrutura 2. Força e momento de flexão sobre protótipo dinâmico (NBR 6123)

$h \text{ (m)}$	$q_i(z)$	$A_i(z) \text{ (m}^2\text{)}$	Ca_i	$F_i(z) \text{ (KN)}$	$h_i \text{ (m)}$	$M_i(z) \text{ (KNm)}$
5	378,6797	105	1,23	50,15	2,5	122,27
	378,6797			0		0
10	461,8355	105	1,23	60,02	7,5	447,35
	544,9914			0		0
15	618,6391	105	1,23	80,12	12,5	998,72
	692,2869			0		0
20	762,1757	105	1,23	98,43	17,5	1722,62
	832,0646			0		0
30	967,2724	210	1,23	249,85	25	6246,16
	1102,48			0		0
40	1235,639	210	1,23	319,17	35	11170,80
	1368,798			0		0
50	1501,826	210	1,23	387,92	45	17456,47
	1634,853			0		0
60	1768,524	210	1,23	456,81	55	25124,54
	1902,195			0		0

A força de projeto do protótipo 2 de 60 m de altura $Fd(p2)$ resulta $Fd(p2) = 1700,63 \text{ KN}$ e o momento de projeto total, na base do protótipo $Md_{Base}(p3)$, no sentido longitudinal do escoamento médio $Md_{Base}(p2) = 63288,91 \text{ KNm}$.

Para transferir a carga do protótipo ao modelo, mantendo as leis de semelhança resulta:

$$Md_{Base}(m2) = Md_{Base}(p2) * \frac{E_f^2}{E_G^2} = 0,32 \text{ Nm} \quad (7.8)$$

$$Fd(m2) = Fd(p2) * \frac{E_f^2}{E_G^4} = 2,54N \quad (7.9)$$

7.1.2 Método estático. Dados de ingresso para o cálculo.

Para comparar, acrescenta-se o cálculo sobre o protótipo, tendo em conta somente a carga estática.

A velocidade de projeto corresponde à velocidade média sobre períodos de 3 segundos, a 10 m de altura do solo, em terreno de categoria II (campo aberto); obtém-se pelo produto:

$$\bar{V}_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (7.10)$$

\bar{V}_k : Velocidade característica do vento.

V_0 : Velocidade básica do vento.

S_2 : Fator que considera a influência da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação e de sua altura sobre o terreno.

$$F_i(z) = C a_i q_i(z) A_i(z) \quad (7.11)$$

A pressão dinâmica se define como:

$$q = 0,613 * \bar{V}_k^2$$

E o momento na base:

$$M(z) = F_i(z) h_i(z) = C a_i q_i(z) A_i(z) h_i(z) \quad (7.12)$$

Tabela 7.3: Estrutura 3. Força e momento de flexão sobre protótipo estático (NBR 6123)

h (m)	S_2	$q_i(z)$	$A_i(z)$ (m^2)	Ca_i	$F_i(z)$ (KN)	h_i (m)	$M_i(z)$ (KNm)
5	0,75	667,557	105	1,35	94,63	2,5	236,57
		667,557			0	0	
10	0,83	742,5607	105	1,35	105,26	7,5	789,43
		817,5645			0	0	
15	0,87	857,9146	105	1,35	121,61	12,5	1520,12
		898,2647			0	0	
20	0,9	929,7734	105	1,35	131,80	17,5	2306,42
		961,2821			0	0	
30	0,95	1016,17	210	1,35	288,08	25	7202,11
		1071,058			0	0	
40	0,99	1117,105	210	1,35	316,70	35	11084,47
		1163,151			0	0	
50	1,02	1198,932	210	1,35	339,90	45	15295,38
		1234,713			0	0	
60	1,05	1271,563	210	1,35	360,49	55	19826,84
		1308,412			0	0	
80	1,09	1359,205	420	1,35	770,67	70	53946,86
		1409,999			0	0	
100	1,12	1449,34	420	1,35	821,78	90	73959,84
		1488,682			0	0	
120	1,14	1515,503	420	1,35	859,29	110	94521,91
		1542,324					

A força de projeto do protótipo $Fd(p3)$ resulta $Fe(p3) = 4210,19$ KN e o momento de projeto total, na base do protótipo $Md_{Base}(p3)$, no sentido longitudinal do escoamento médio $Me_{Base}(p3) = 280689,94$ KNm.

Para transferir a carga do protótipo ao modelo, mantendo as leis de semelhança resulta:

$$Md_{Base}(m3) = Md_{Base}(p3) \frac{E_f^2}{E_G^2} = 1,39 Nm \quad (7.13)$$

$$Fd(m3) = Fd(p3) \frac{E_f^2}{E_G^4} = 6,30 N \quad (7.14)$$

Tabela 7.4: Estrutura 2. Força e momento de flexão sobre protótipo estático (NBR 6123)

h (m)	S_2	$q_i(z)$	$A_i(z)$ (m^2)	Ca_i	$F_i(z)$ (KN)	h_i (m)	$M_i(z)$ (KNm)
5	0,82	797,9828	105	1,23	103,06	2,5	257,65
		797,9828			0		0
10	0,88	858,508	105	1,23	110,88	7,5	831,57
		919,0331			0		0
15	0,93	972,7344	105	1,23	125,63	12,5	1570,36
		1026,436			0		0
20	0,96	1060,081	105	1,23	136,91	17,5	2395,91
		1093,725			0		0
30	1	1140,247	210	1,23	294,53	25	7363,14
		1186,768			0		0
40	1,04	1235,188	210	1,23	319,05	35	11166,72
		1283,608			0		0
50	1,06	1308,53	210	1,23	337,99	45	15209,70
		1333,453			0		0
60	1,09	1371,726	210	1,23	354,32	55	19487,42
		1409,999			0		0

A força de projeto do protótipo $Fd(p3)$ resulta $Fe(p2) = 1782,36 \text{ KN}$ e o momento de projeto total, na base do protótipo $Md_{Base}(p3)$, no sentido longitudinal do escoamento médio $Me_{Base}(p2) = 58282,48 \text{ KNm}$.

Para transferir a carga do protótipo ao modelo, mantendo as leis de semelhança resulta:

$$Md_{Base}(m2) = Md_{Base}(p2) \frac{E_f^2}{E_G^2} = 0,29 \text{ Nm} \quad (7.15)$$

$$Fd(m2) = Fd(p2) \frac{E_f^2}{E_G^4} = 2,66 \text{ N} \quad (7.16)$$

7.2 NORMA ARGENTINA CIRSOC 102 (NOVEMBRO 2002)

7.2.1 Cargas de vento de projeto sobre edifícios abertos e outras estruturas

O momento na base e a força de projeto se determinam a partir da seguinte expressão

$$M_{Base} = \sum M_i(z) = \sum F_i(z)h_i \quad (7.17)$$

$$F = \sum F_i(z) = \sum q_{zi}G_f C_{fi} A_{fi} \quad (7.18)$$

Sendo q_{zi} a pressão dinâmica avaliada à altura z do baricentro da área correspondente à coordenada

G_f Fator de efeito de rajada

C_{fi} Coeficiente de força

A_{fi} Área projetada normal ao vento em m^2

A pressão dinâmica à altura z é definida como:

$$q_z = 0,613k_z k_{zi} k_d V^2 I \quad (7.19)$$

sendo

K_z Coeficiente de exposição

K_{zi} Fator topográfico

K_d Fator de direcionalidade do vento

V : Velocidade básica do vento

I : Fator de importância

O fator de efeito de rajada, para estruturas dinamicamente sensíveis, é definido como:

$$G_f = 0,925 \left(\frac{1 + 1,7I_z \sqrt{g_Q^2 Q^2 + g_R^2 R^2}}{1 + 1,7g_V I_z} \right) \quad (7.20)$$

definido g_R e I_z como

$$g_R = \sqrt{2 \ln(3600f_1)} + \frac{0,577}{\sqrt{2 \ln(3600f_1)}} \quad (7.21)$$

$$I_z = c \left(\frac{10}{z} \right)^{1/6} \quad (7.22)$$

sendo z a altura equivalente da estrutura ($0,6H$ mas não menor do que z_{\min} para todos os edifícios de altura H). Os valores de c e z_{\min} são dados na Tabela 4.

O fator de resposta ressonante se define como:

$$R = \sqrt{\frac{1}{\beta} R_n R_h R_B (0,53 + 0,47 R_L)} \quad (7.23)$$

Para $\eta = 0$, $R_l = 1$

para $\eta > 0$

$$R_n = \frac{7,47 N_1}{(1 + 10,3 N_1)^{5/3}} \quad (7.24)$$

$$e \ N_1 = \frac{f_1 L_z}{V_z}$$

Para $\eta > 0$

$$R_l = \frac{1}{\eta} - \frac{1}{2\eta^2} (1 - e^{-2\eta}) \quad (7.25)$$

e $R_l = 1$ para $\eta = 0$.

O subíndice l se refere a H , B ou P respectivamente.

f_1 : a frequência natural do edifício

$$R_l = R_H \text{ quando } \eta = 4,6 f_1 \frac{H}{V_z}$$

$$R_l = R_B \text{ quando } \eta = 4,6 f_1 \frac{B}{V_z}$$

$$R_l = R_P \text{ quando } \eta = 4,6 f_1 \frac{P}{V_z}$$

β : Relação de amortecimento, porcentagem do crítico.

H : Altura média superior da estrutura.

B : Dimensão horizontal medida normalmente ao escoamento (largura)

P : Dimensão horizontal medida na direção ao escoamento (profundidade)

$$\bar{V}_z = \bar{b} \left(\frac{z}{10} \right)^{\bar{\alpha}} V$$

com \bar{b} e $\bar{\alpha}$ da Tabela 4 e V a velocidade básica do vento em m/s.

\bar{V}_z : Velocidade média horária do vento à altura z

Tabela 7.5: Estrutura 3. Força e momento de flexão sobre protótipo dinâmico (CIRSOC 102)

h (m)	K_{zi}	$q_i(z)$	$A_i(z)$ (m ²)	Ca_i	$F_i(z)$ (KN)	h_i (m)	$M_i(z)$ (KNm)
5	0,59	805,22	105	1,4	114,62	2,5	286,55
		805,22					0
10	0,72	893,93	105	1,4	127,25	7,5	954,35
		982,64					0
15	0,81	1044,05	105	1,4	148,62	12,5	1857,70
		1105,47					0
20	0,88	1153,24	105	1,4	164,16	17,5	2872,76
		1201,01					0
25	0,93	1235,13	105	1,4	175,82	22,5	3955,81
		1269,25					0
30	0,98	1303,37	105	1,4	185,53	27,5	5101,99
		1337,49					0
40	1,07	1398,90	210	1,4	398,25	35	13938,82
		1460,32					0
50	1,14	1508,08	210	1,4	429,34	45	19320,09
		1555,85					0
60	1,2	1596,79	210	1,4	454,59	55	25002,46
		1637,74					0
90	1,35	1740,09	630	1,4	1486,16	75	111462,03
		1842,45					0
105	1,41	1883,40	315	1,4	804,27	97,5	78416,82
		1924,34					0
120	1,46	1958,46	315	1,4	836,33	112,5	94087,07
		1992,58					

A força de projeto do protótipo $Fd(p3)$ resulta $Fd(p3) = 5324,92$ KN e o momento de projeto total, na base do protótipo $Md_{Base}(p3)$, no sentido longitudinal do escoamento médio $Md_{Base}(p3) = 357256,45$ KNm.

Para transferir a carga do protótipo ao modelo, mantendo as leis de semelhança resulta:

$$Md_{Base}(m3) = Md_{Base}(p3) \frac{E_f^2}{E_G^2} = 1,78 Nm \quad (7.26)$$

$$Fd(m3) = Fd(p3) \frac{E_f^2}{E_G^4} = 7,95 N \quad (7.27)$$

Tabela 7.6: Estrutura 2. Força e momento de flexão sobre protótipo dinâmico (CIRSOC 102)

h (m)	K_{zi}	$q_i(z)$	$A_i(z)$ (m ²)	Ca_i	$F_i(z)$ (KN)	h_i (m)	$M_i(z)$ (kNm)
5	0,59	805,22	105	1,4	113,32	2,5	283,31
		805,22					0
10	0,72	893,93	105	1,4	125,81	7,5	943,55
		982,64					0
15	0,81	1044,05	105	1,4	146,93	12,5	1836,68
		1105,47					0
20	0,88	1153,24	105	1,4	162,30	17,5	2840,26
		1201,01					0
25	0,93	1235,1288	105	1,4	173,82	22,5	3911,05
		1269,24					0
30	0,98	1303,36	105	1,4	183,43	27,5	5044,28
		1337,48					0
40	1,07	1398,90	210	1,4	393,75	35	13781,13
		1460,31					0
50	1,14	1508,08	210	1,4	424,48	45	19101,51
		1555,85					0
60	1,2	1596,79	210	1,4	449,48	55	24719,60
		1637,73					0

A força de projeto do protótipo $Fd(p2)$ resulta $Fd(p2) = 2173,29$ KN e o momento de projeto total, na base do protótipo $Md_{Base}(p2)$, no sentido longitudinal do escoamento médio $Md_{Base}(p2) = 72461,36$ kNm. Para transferir a carga do protótipo ao modelo, mantendo as leis de semelhança resulta:

$$Md_{Base}(m2) = Md_{Base}(p2) \frac{E_f^2}{E_G^2} = 0,36 Nm \quad (7.28)$$

$$Fd(m2) = Fd(p2) \frac{E_f^2}{E_G^4} = 3,24 N \quad (7.29)$$

7.2.2 Cargas estáticas de vento de projeto sobre edifícios rígidos

Neste caso, o coeficiente de efeito de rajada deve ser calculado como:

$$G = 0,925 \left(\frac{1 + 1,7g_o I_z Q}{1 + 1,7g_v I_z} \right) \quad (7.30)$$

As magnitudes g_o e g_v são iguais a 3,4. A resposta base Q será igual a

$$Q = \sqrt{\frac{1}{1 + 0,63 \left(\frac{B+H}{L_z} \right)^{0,63}}} \quad (7.31)$$

Onde L_z Escala integral da turbulência à altura equivalente da componente flutuante longitudinal, com l e $\bar{\varepsilon}$ estão indicados na Tabela 4.

$$L_z = l \left(\frac{z}{10} \right)^{\bar{\varepsilon}} \quad (7.32)$$

Tabela 7.7: Estrutura 3. Força e momento de flexão sobre protótipo rígido (CIRSOC 102)

h (m)	K_{zi}	$q_i(z)$	$A_i(z)$ (m ²)	Ca_i	$F_i(z)$ (KN)	h_i (m)	$M_i(z)$ (KNm)
5	0,59	805,22	105	1,4	97,96	2,5	244,88
		805,22					0
10	0,72	893,93	105	1,4	108,74	7,5	815,58
		982,64					0
15	0,81	1044,05	105	1,4	127,01	12,5	1587,58
		1105,47					0
20	0,88	1153,24	105	1,4	140,29	17,5	2455,04
		1201,01					0
25	0,93	1235,12	105	1,4	150,25	22,5	3380,61
		1269,24					0
30	0,98	1303,36	105	1,4	158,55	27,5	4360,14
		1337,48					0
40	1,07	1398,90	210	1,4	340,34	35	11912,04
		1460,32					0
50	1,14	1508,08	210	1,4	366,91	45	16510,83
		1555,85					0
60	1,2	1596,79	210	1,4	388,49	55	21366,96
		1637,74					0
90	1,35	1740,09	630	1,4	1270,06	75	95254,78
		1842,45					0
105	1,41	1883,41	315	1,4	687,33	97,5	67014,54
		1924,34					0
120	1,46	1958,46	315	1,4	714,72	112,5	80406,24
		1992,58					

A força total sobre as estruturas resulta $Fe(p3) = 4550,65 \text{ KN}$ e o momento total, na base do modelo, no sentido longitudinal do escoamento médio $Me_{Base}(p3) = 305309,22 \text{ KNm}$.

Para transferir a carga do protótipo ao modelo, mantendo as leis de semelhança resulta:

$$Md_{Base}(m3) = Md_{Base}(p3) \frac{E_f^2}{E_G^2} = 1,52 \text{ Nm} \quad (7.33)$$

$$Fd(m3) = Fd(p3) \frac{E_f^2}{E_G^4} = 6,80 \text{ N} \quad (7.34)$$

Tabela 7.8: Estrutura 2. Força e momento de flexão sobre protótipo rígido (CIRSOC 102)

$h \text{ (m)}$	K_{zi}	$q_i(z)$	$A_i(z) \text{ (m}^2\text{)}$	Ca_i	$F_i(z) \text{ (KN)}$	$h_i \text{ (m)}$	$M_i(z) \text{ (KNm)}$
5	0,59	805,22	105	1,4	99,08	2,5	247,71
		805,22					0
10	0,72	893,93	105	1,4	110,00	7,5	824,99
		982,64					0
15	0,81	1044,05	105	1,4	128,47	12,5	1605,90
		1105,47					0
20	0,88	1153,24	105	1,4	141,91	17,5	2483,37
		1201,01					0
25	0,93	1235,13	105	1,4	151,98	22,5	3419,62
		1269,24					0
30	0,98	1303,37	105	1,4	160,38	27,5	4410,44
		1337,48					0
40	1,07	1398,91	210	1,4	344,27	35	12049,47
		1460,32					0
50	1,14	1508,08	210	1,4	371,14	45	16701,32
		1555,85					0
60	1,2	1596,79	210	1,4	392,97	55	21613,48
		1637,74					0

A força total sobre a estrutura resulta $Fe(p2) = 1900,21 \text{ KN}$ e o momento total, na base do modelo, no sentido longitudinal do escoamento médio $Me_{Base}(p2) = 63356,29 \text{ KNm}$.

Para transferir a carga do protótipo ao modelo, mantendo as leis de semelhança resulta:

$$Md_{Base}(m2) = Md_{Base}(p2) \frac{E_f^2}{E_G^2} = 0,31 \text{ Nm} \quad (7.35)$$

$$Fd(m2) = Fd(p2) \frac{E_f^2}{E_G^4} = 2,84N \quad (7.36)$$

Para transferir a carga sobre o protótipo ao modelo, mantendo as leis de semelhança resulta:

Tabela 7.9: Momento e forças sobre modelo e protótipo 2

Códigos	Cargas	Estrutura 2			
		Prototipo 2		Modelo 2	
		Força (KN)	Momento (KNm)	Força (N)	Momento (Nm)
Argentina	Dinâmica	2173	72461	3,24	0,36
	Estática	1900	63356	2,83	0,31
Brasileira	Dinâmica	1700	63288	2,54	0,31
	Estática	1782	58282	2,66	0,29

Tabela 7.10: Momento e forças sobre modelo e protótipo 3

Códigos	Cargas	Estrutura 3			
		Prototipo 3		Modelo 3	
		Força (KN)	Momento (KNm)	Força (N)	Momento (Nm)
Argentina	Dinâmica	5325	357256	7,95	1,78
	Estática	4551	305309	6,79	1,52
Brasileira	Dinâmica	4754	35400	7,10	1,76
	Estática	4210	280690	6,28	1,39

8. ENSAIO DINÂMICO EM TÚNEL DE VENTO DE ESTRUTURAS ALTAS EM AMBIENTE URBANO

Para determinar a influência nas cargas de vento do entorno imediato ao modelo, ensaiaram-se, em túnel de vento, modelos dinâmicos de estruturas altas, isoladas e com entornos variáveis.

Neste capítulo, apresentam-se resultados correspondentes às componentes médias longitudinais, transversais e de torção, e flutuantes dos momentos longitudinais e transversais, medidos em modelos dinâmicos de 20 e 40 cm de altura.

Para comparar as cargas experimentais com as prescritas pelas normas da Argentina e Brasil, apresentadas no capítulo 7, mediram-se as cargas em modelos isolados. Comparando essas previsões com os resultados obtidos ao introduzir os modelos físicos do entorno próximo (*near field*), foi analisada a validade dos procedimentos recomendados pelas normas nomeadas.

8.1 DETERMINAÇÃO DOS MOMENTOS DE FLEXÃO E DE TORÇÃO NA BASE

Os modelos foram montados na balança apresentada no capítulo 6 e foram localizados no centro da região simulada. Para estudar a incidência da direção do vento de fundo, cada modelo físico foi girado a intervalos de 30°, até completar uma rotação de 360°.

Na tabela 8.1 pode-se apreciar as dimensões dos protótipos e as dimensões físicas dos modelos, altura em escala de simulação e frequência natural (f_n) em função das características das simulações da camada limite utilizada.

Tabela 8.1: Características dos protótipos e modelos

Características	PROTÓTIPOS		MODELOS	
	2	3	2	3
Altura (m)	60	120	0,20	0,40
f_n (Hz)	1,1	0,5	120	55

Em cada posição, mediram-se, durante 96 segundos, os momentos longitudinal, transversal e de torção. Esse intervalo de tempo corresponde a mais de 160 minutos na atmosfera, para uma escala de tempo de 1/110. Na Figura 8.1 se observa o modelo mais alto e seu entorno urbano. A frequência de aquisição dos momentos foi de 400 e 500 Hz nos modelos 2 e 3, respectivamente.



Fig. 8.1: Modelo 3 no interior câmara de ensaio

Para cada posição angular do modelo determinaram-se o coeficiente de momento médio, os desvios padrões dos coeficientes, dezesseis coeficientes de momento máximo, um em cada 6 segundos de registro (aproximadamente 10 minutos na atmosfera), os coeficientes de momento máximo médio e os fatores de amplificação e de pico, os quais se definem da seguinte maneira:

$$C_{\overline{M}_I} = \frac{\overline{M}_I}{q_{ref} A_{ref} b_{ref}} \quad (8.1)$$

sendo

\overline{M}_I : momento médio longitudinal ($I=Y$), ou transversal ($I=X$), ou de torção ($I=T$),

A_{ref} : área de referência, constituída pela superfície frontal do modelo,

q_{ref} : pressão dinâmica de referência, em região não perturbada, na cota correspondente ao topo do modelo, medida com tubo de Pitot- Prandtl e micro manômetro tipo Betz,

b_{ref} : largura do modelo,

$C_{\overline{MI}}$: coeficiente de momento médio longitudinal ($I=Y$), ou transversal ($I=X$), ou de torção ($I=T$).

$$\eta_I = \frac{C_{\dot{MI}}}{C_{\overline{MI}}} \quad (8.2)$$

sendo

$C_{\dot{MI}}$: coeficiente de momento máximo longitudinal ($I=Y$) ou transversal ($I=X$),

$C_{\overline{MI}}$: coeficiente de momento médio longitudinal ($I=Y$) ou transversal ($I=X$),

η_I : fator de amplificação de momento longitudinal ($I=Y$) ou transversal ($I=X$).

O coeficiente de momento máximo $C_{\dot{MI}}$ determina-se como o valor médio dos máximos obtidos no registro em cada posição de medição. Cada registro foi dividido em 16 mostras de duração temporal de 10 minutos na atmosfera. Assim sendo, o registro teve uma duração de 96 segundos (escala temporal de 1/110), divididos em 16 mostras de seis segundos. Em cada mostra determino-se o máximo valor, obtendo-se o coeficiente máximo do momento como o valor médio dos 16 máximos do registro. Para simplificar, $C_{\dot{MI}}$ será denominado simplesmente como o máximo valor do registro.

$$F_I = \frac{C_{\dot{MI}} - C_{\overline{MI}}}{\sigma_{MI}} \quad (8.3)$$

Sendo

σ_{MI} : desvio padrão de coeficiente de momento longitudinal ($I=Y$) ou transversal ($I=X$) do registro,

F_I : fator de pico de momento longitudinal ($I=Y$) ou transversal ($I=X$).

8.2 COEFICIENTES DE MOMENTOS

8.2.1 Coeficientes de momentos no modelo 3

Nas Figuras 8.2 e 8.3, mostram-se espectros dos momentos longitudinais e transversais mantendo rugosidade do entorno obtidos em S20003 e S30903 respectivamente. Nos espectros medidos, observa-se a amplificação nas respostas à ação do vento na frequência fundamental do modelo.

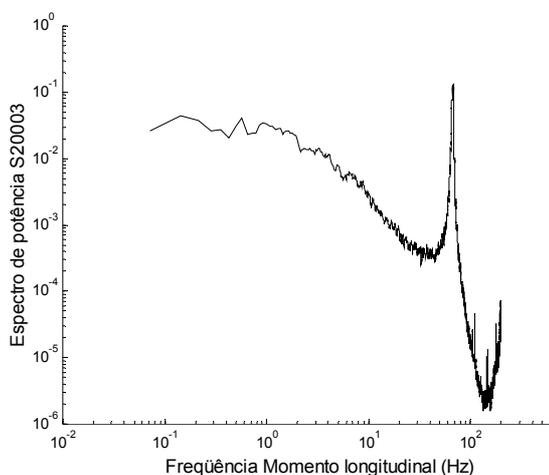


Fig. 8.2: Espectro da resposta longitudinal

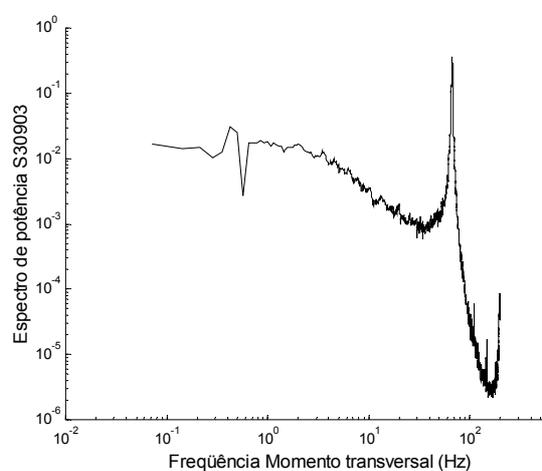


Fig. 8.3: Espectro da resposta transversal

Os coeficientes de momento longitudinal e transversal médio obtidos para cada posição angular do modelo físico de centro urbano denso (S2 – S3) e modelo 3, mostram-se nas Figuras 8.4 e 8.5. Nos modelos físicos S4, S5, S6, R3 e R6, os coeficientes de momentos médios longitudinal e transversal obtidos ao variar a direção do escoamento de fundo, apresentam distribuição e âmbito de variação semelhantes aos medidos em S2 e S3.

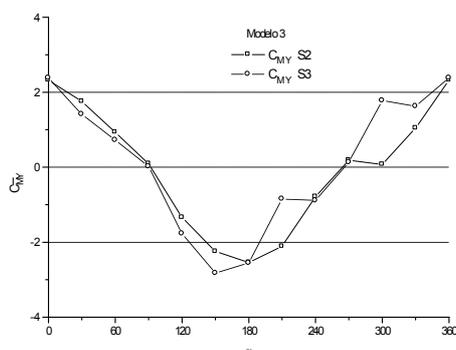


Fig. 8.4: C_{MY} versus α

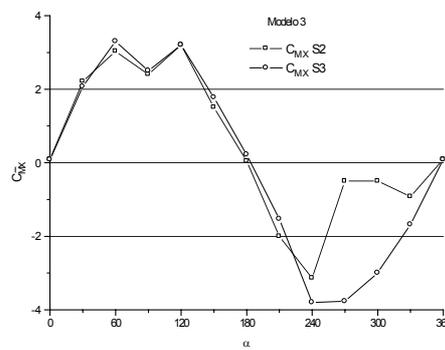


Fig. 8.5: C_{MX} versus α

Geralmente, os coeficientes de momento médio longitudinal e transversal na base, distribuem-se de maneira semelhante às variações medidas em modelos isolados, constituídas por funções proporcionais às harmônicas simples (seno e coseno), no entanto, em algumas posições, observam-se alterações na distribuição de coeficientes, tornando evidente a influência do entorno.

Nas Figuras 8.6 e 8.7, mostram-se os fatores de amplificação do momento longitudinal e transversal (η_I) versus os coeficientes de momento médio respectivos.

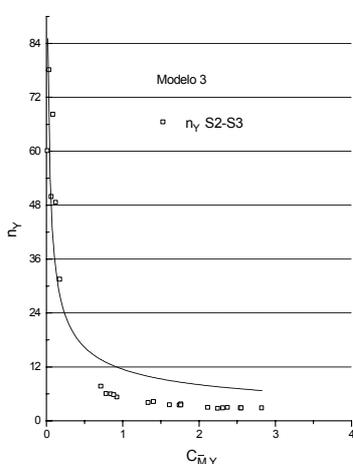


Fig. 8.6: η_Y versus C_{MY}

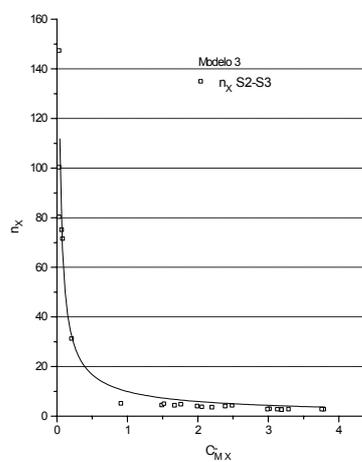
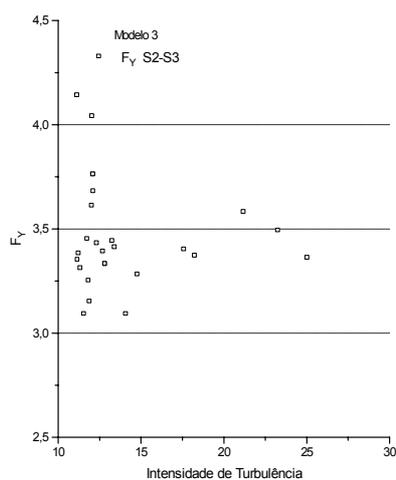
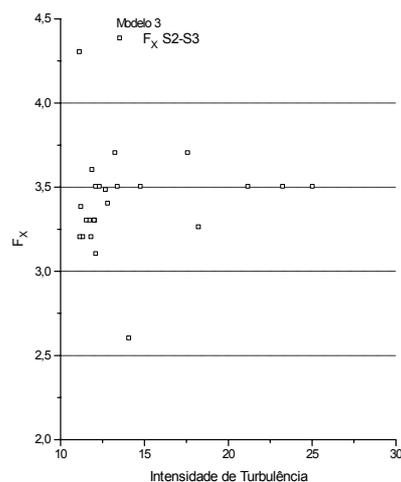


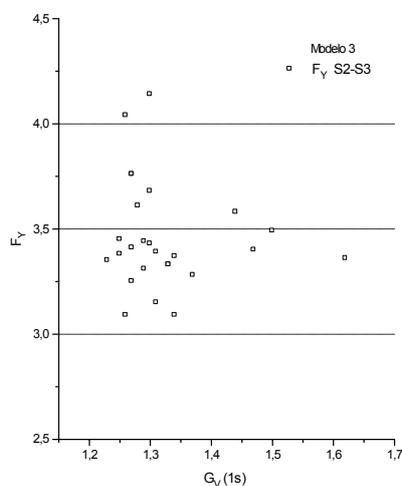
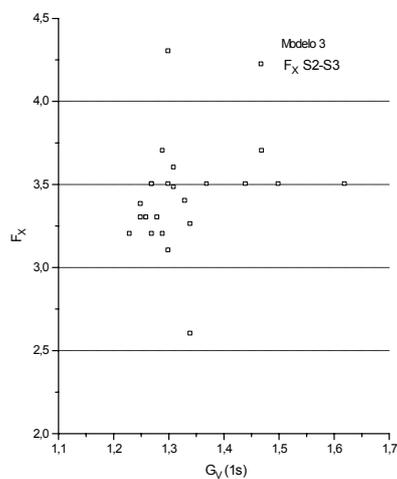
Fig. 8.7: η_X versus C_{MX}

Um comportamento semelhante se observou nos modelos físicos S4, S5, S6, R3 e R6. Os fatores de amplificação diminuem exponencialmente ao aumentar os coeficientes de momentos médios. Os máximos fatores de amplificação ocorrem quando os coeficientes de momentos longitudinais e transversais médios diminuem, para ângulos no âmbito 90° - 270° e 0° - 180° , respectivamente. Nas demais direções, eles permanecem quase constantes.

Na Figura 8.8 e 8.9, apresentam-se o fator pico do momento longitudinal e transversal versus a intensidade de turbulência medida na mesma direção do vento incidente e na altura da coberta.

Fig. 8.8: F_Y versus IT Fig. 8.9: F_X versus IT

Na Figura 8.10 e 8.11 apresentam-se os fatores de pico das figuras anteriores em função da máxima velocidade de vento (\hat{V}), medida na cota da cobertura do edifício, para cada posição angular do modelo físico. Em todos os casos analisados, observa-se que os fatores de pico variam em torno do valor 3,5, diminuindo a dispersão ao aumentar a intensidade de turbulência e as velocidades máximas.

Fig. 8.10: F_Y versus \hat{V} Fig. 8.11: F_X versus \hat{V}

No entanto, como se mostra nas Figuras 8.12 e 8.13, ao diminuir a intensidade de turbulência do escoamento de fundo (R3- R6) e a densidade superficial (S4- S5- S6), a variação dos fatores picos F_X se modifica com relação à observada nos modelos físicos anteriores, tornando-se evidente uma maior dispersão dos resultados. Nestes casos, os fatores de pico não diminuem ao aumentar a intensidade de turbulência da componente flutuante longitudinal do escoamento incidente, tornando evidente que os momentos transversais, que

correspondem à direção paralela à maior dimensão transversal do modelo, não mantêm relação com as flutuações da componente longitudinal do escoamento de vento médio incidente. Não obstante, os fatores de pico, para os dois momentos e em todos os modelos físicos analisados, variam no intervalo de 3,2 a 3,7, semelhantes aos valores determinados nos modelos físicos S2 e S3.

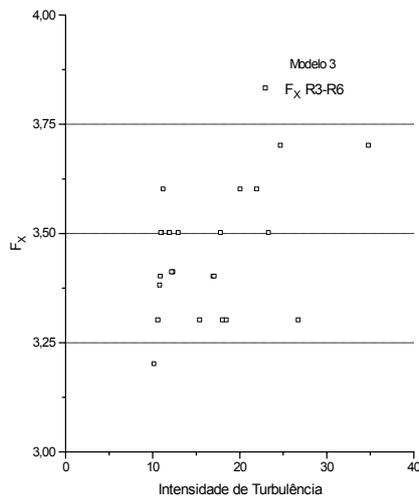


Fig. 8.12: F_x versus IT

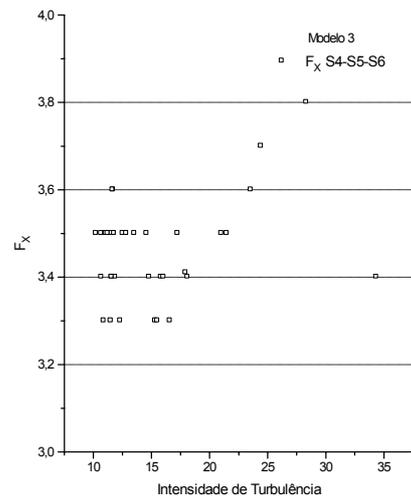


Fig. 8.13: F_x versus IT

Para modelos físicos S2- S3, na Figura 8.14, apresenta-se o coeficiente de momento de torção médio, em função da direção do escoamento de fundo. Nos gráficos apresentados, os coeficientes do momento de torção médio evidenciam um comportamento semelhante nos dois modelos físicos, com exceção de duas direções do vento de fundo.

Para os modelos físicos S4- S5- S6 e os modelos físicos R3 e R6 os coeficientes de momento de torção médio, ao variar a direção do escoamento de fundo, mantêm-se em torno dos valores correspondentes aos modelos físicos S2 e S3.

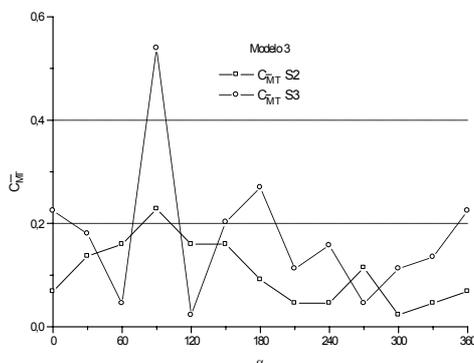


Fig. 8.14: C_{MT} versus α

Com o modelo 3, para cada modelo físico e direção do vento de fundo determinaram-se as correlações cruzadas entre momentos flutuantes medidos em forma simultânea. No Relatório Técnico 2 (De Bortoli, 2005) apresentam-se os valores de correlação medidos com cada modelo físico e direção de vento de fundo analisados.

A correlação cruzada entre o momento longitudinal e transversal é, em média, positiva com valor de 0,37, aproximadamente, para os modelos físicos analisados e direções de vento de fundo de 0°, 30° e 60°. Este valor diminui sensivelmente para 90°, 120° e 150°, recuperando-se para 180°, 210° e 240°, diminuindo novamente para 270°, 300° e 330°.

O exposto sugere que, se a fachada menor se expõe perpendicularmente à direção do escoamento médio de fundo (0°, 30°, 180°, 210° e 240°), sendo o modelo semi-rígido, a excitação que provoca as respostas transversais e longitudinais é semelhante.

A Figura 8.15 mostra a figura elíptica com seus eixos maiores inclinados, a qual se obtém ao desenhar as flutuações dos momentos MYS30003-MXS30003, indicando a existência de uma correlação entre as duas componentes. Na Figura 8.16 mostram-se flutuações dos momentos MYS30903-MXS30903. Ao fazer o gráfico MYS30903-MXS30903 forma-se uma figura circular, corroborando a independência estatística.

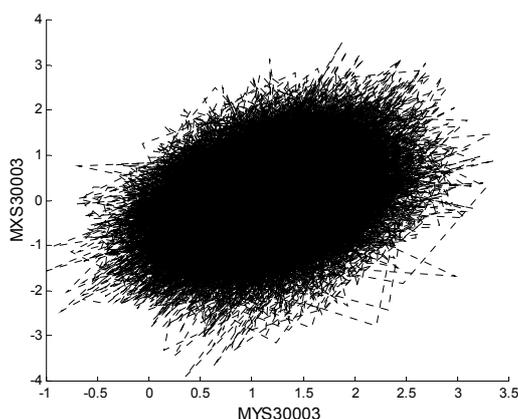


Fig. 8.15: MYS30003-MXS30003

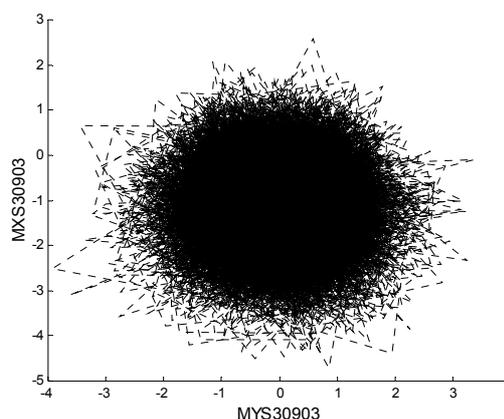


Fig. 8.16: MYS30903-MXS30903

Do Relatório Técnico 2 (De Bortoli, 2005) observa-se que as correlações entre o momento transversal (X) e de torção (T) foram máximas nas direções analisadas, oscilando entre -0,87 e -0,17. A respeito das correlações entre o momento longitudinal (Y) e torção (T), ao girar o entorno imediato, os valores das correlações são variáveis, impedindo identificar o mecanismo de geração que os vincula.

Nas Figuras 8.17 e 8.18 mostram-se flutuações dos momentos MXS30903-MTS30903 e MYS30903-MTS30903.

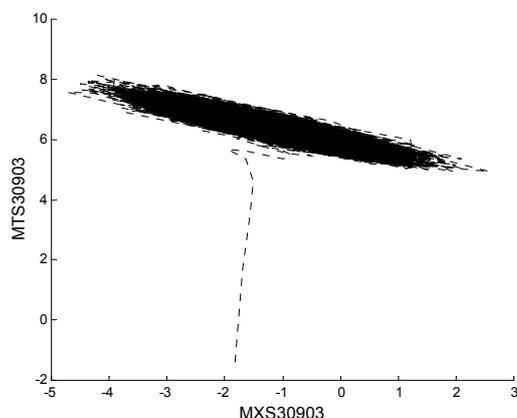


Fig. 8.17: MXS30903-MTS30903

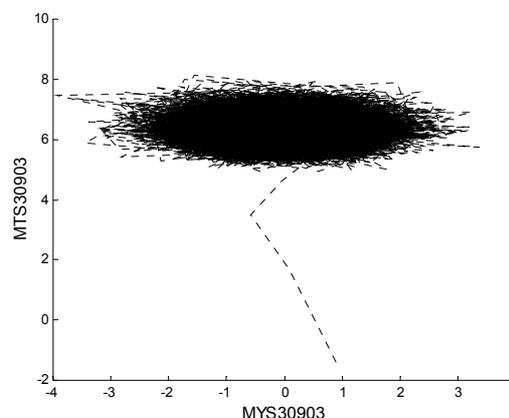


Fig. 8.18: MYS30903-MTS30903

As traças dos MXS30903-MTS30903 exibem uma forma que indica uma correlação alta, isto se corrobora ao comparar as formas espectrais. Na Figura 8.19 mostram-se os espectros respectivos.

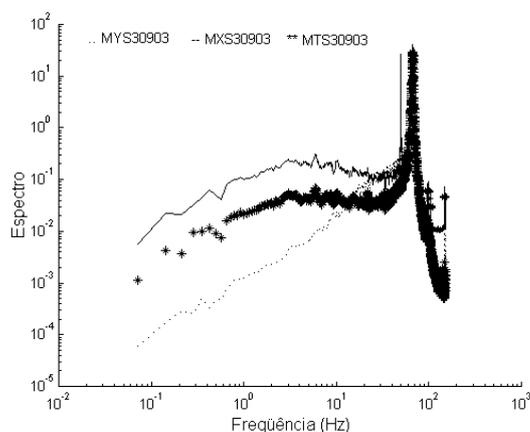


Fig. 8.19: Espectros MYS30903-MXS30903-MTS30903

As traças dos MYS30903-MTS30903 exibem uma forma elipsoidal, com eixos principais horizontais e verticais, traduzindo-se em correlação nula. Estas evidências se corroboram ao analisar as formas espectrais das respostas flutuantes, coincidindo as duas formas, somente na resposta ressonante, diminuindo o conteúdo de energia do momento longitudinal, rapidamente, para energias imediatamente inferiores.

Para corroborar o exposto anteriormente, realizou-se, para 0° , uma análise semelhante, advertindo que as correlações, nesta posição, têm valores diferentes. Nas Figuras 8.20 e 8.21 mostram-se flutuações dos momentos MXS30003-MTS30003 e MYS30003-MTS30003.

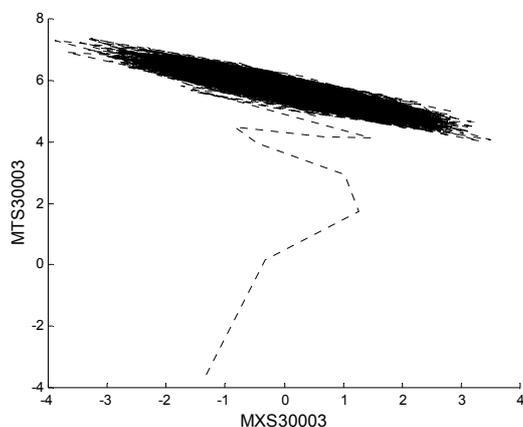


Fig. 8.20: MXS30003-MTS30003

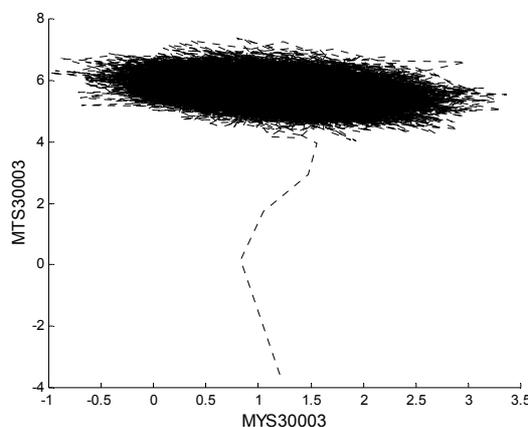


Fig. 8.21: MYS30003-MTS30003

A Figura 8.15 mostra a figura elíptica com seus eixos maiores inclinados, a qual se obtém ao desenhar as flutuações dos momentos MYS30003-MXS30003, indicando a existência de uma correlação entre as duas componentes. A Figura 8.20 representa as flutuações de MXS30003-MTS30003, onde se exibe alta correlação, no entanto a Figura 8.21 exibe uma forma elipsoidal, com eixos principais levemente inclinados, inferindo-se uma correlação baixa entre os esforços MYS30003-MTS30003.

O dito se verifica ao analisar os espectros na Figura 8.22, evidenciando a componente longitudinal (Y), uma categoria de frequências contíguas e inferiores à fundamental, que permanecem constante, semelhante àquilo que acontece com a componente longitudinal. Esta categoria de frequências, com comportamento semelhante nas duas respostas, é responsável pela correlação existente entre os dois esforços analisados.

Os espectros dos esforços transversais (X) e torção (T) coincidem na sua forma, em toda a categoria de frequências analisadas, devido à excitação quase-estática.

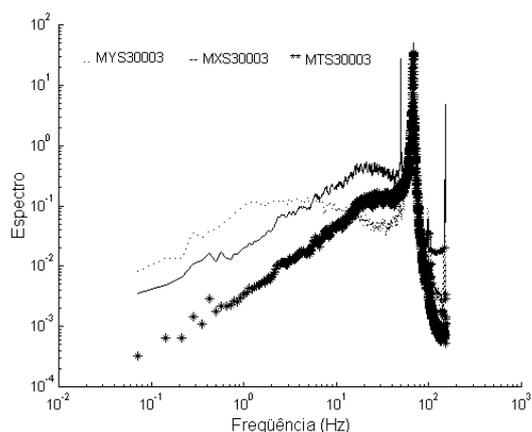


Fig. 8.22: Espectros MYS30003-MXS30003-MTS30003

Ao ensaiar o modelo em túnel em vazio, em 0° e 90° , a correlação entre momento longitudinal e transversal é nula, aumentando em 30° e 60° . Para as direções de 30° e 60° , os sensores que medem as flutuações de momento transversal e longitudinal se situam numa direção oblíqua à direção do escoamento médio. Assim sendo, os dois sensores percebem deformações produzidas por componentes dos esforços longitudinais provocados pela mesma fonte de excitação (escoamento de fundo).

8.2.2 Coeficientes de momentos no modelo 2

Na Figura 8.23 e 8.24, mostram-se espectros da resposta longitudinal e transversal do modelo 2, medidos em S80002 e S30902, que indicam a amplificação das respostas, nas duas primeiras frequências, indicando que foram reproduzidas as dos primeiros modos de vibração. Observar que os dois primeiros modos são idênticos.

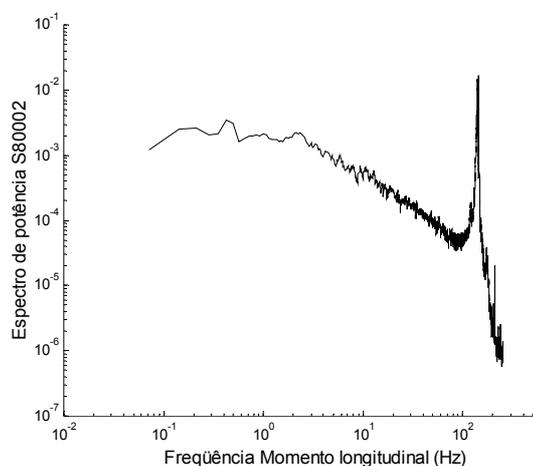


Fig. 8.23: Espectro da resposta longitudinal

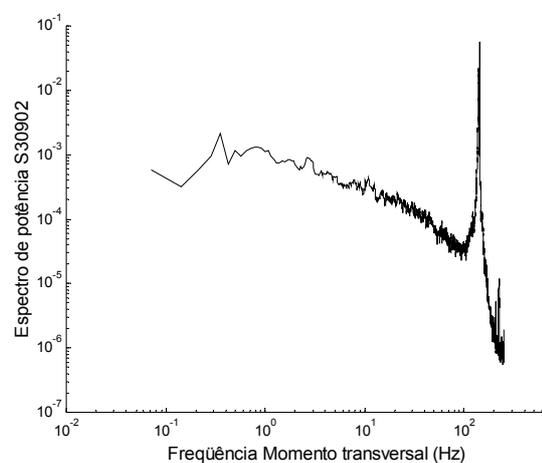


Fig. 8.24: Espectro da resposta transversal

Nas Figuras 8.25 e 8.26, observam-se coeficientes de momentos médios longitudinais e transversais medidos com os modelos físicos S2 e S3, ao variar o ângulo de incidência do vento em intervalos de 30°.

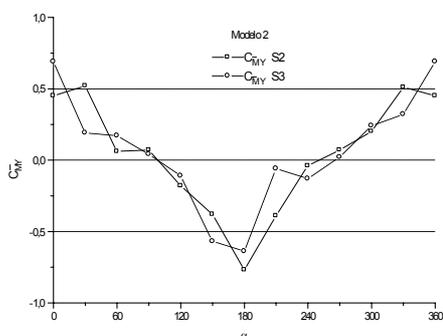


Fig. 8.25: C_{MY} versus α

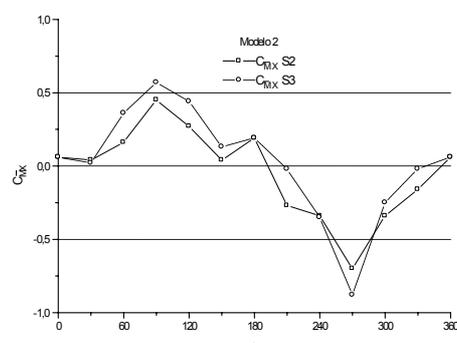


Fig. 8.26: C_{MX} versus α

Nos outros modelos físicos analisados, a dispersão dos coeficientes de momentos médios impede de apreciar, claramente, a relação entre a direção de vento de fundo e a resposta longitudinal e transversal, representada geralmente, por funções proporcionais às harmônicas de seno e cosseno, respectivamente. Isto acontece porque o modelo tem 20 cm de altura e se situa na região de escoamento tridimensional, na qual o efeito de proteção e interferência, provocado pelo entorno imediato, é intenso.

As Figuras 8.27 e 8.28 mostram a distribuição do fator de amplificação do momento longitudinal e transversal (η_I), a respeito do coeficiente de momento médio.

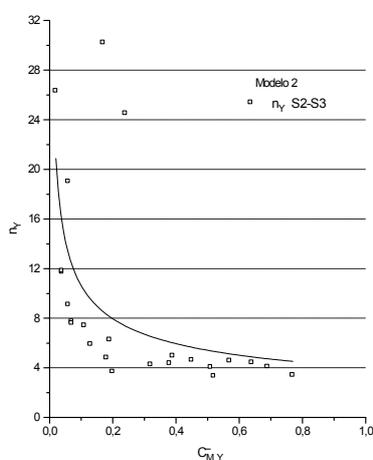


Fig. 8.27: η_Y versus C_{MY}

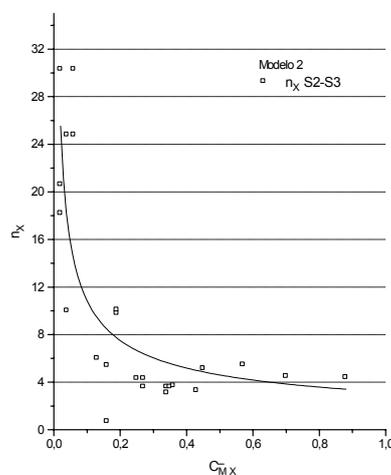


Fig. 8.28: η_X versus C_{MX}

Os fatores de amplificação de momento, em todos os modelos físicos analisados, mantêm uma distribuição semelhante à indicada nas figuras anteriores.

Nas figuras 8.29 e 8.30 não se observa a diminuição da dispersão dos fatores de pico do momento longitudinal e transversal F_I ao aumentar a intensidade de turbulência. Este efeito foi observado em todos os modelos físicos analisados, comprovando a influência do entorno imediato na resposta do modelo situado na região de escoamento tridimensional. No entanto, pode se ver que, em geral, os fatores de pico de momento F_I se distribuem em torno a um valor igual a 4.

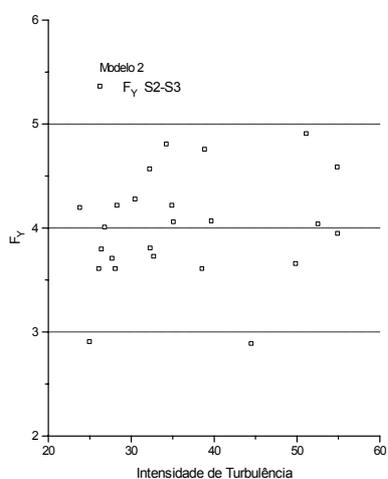


Fig. 8.29: F_Y versus IT

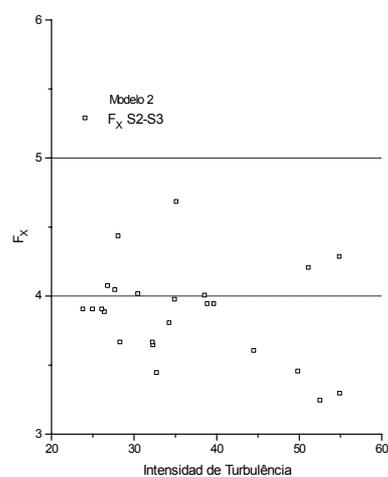


Fig. 8.30: F_X versus IT

Na Figura 8.31 apresenta-se o coeficiente de momento de torção médio ao variar a direção do escoamento de fundo.

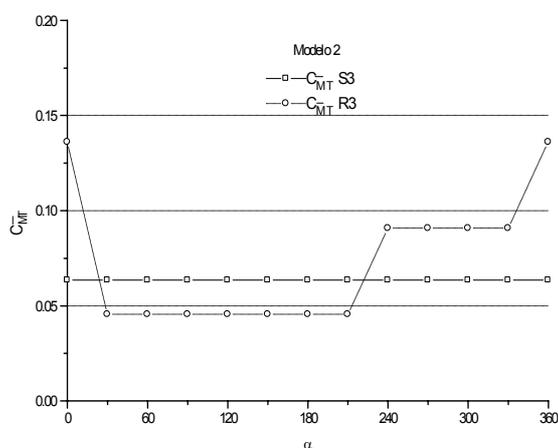


Fig. 8.31: C_{MT} versus α

Em todos os modelos físicos analisados, os coeficientes de momento de torção médio, para o modelo 2, permanecem aproximadamente constantes, independente da direção do escoamento médio de fundo, com valor de 0,08.

Isto corrobora que, para o modelo de forma prismática regular, com altura duas vezes superior à média dos obstáculos, exposto aos efeitos de interferência com modelos de altura variáveis, situados em ambiente urbano denso e variando a densidade superficial, a resposta à torção não é modificada pelo entorno, não tem importância relevante no momento do projeto, podendo adotar, como valor para o projeto, aquele fornecido por códigos e normas de vento, obtido em condições de escoamento suburbano e modelo isolado.

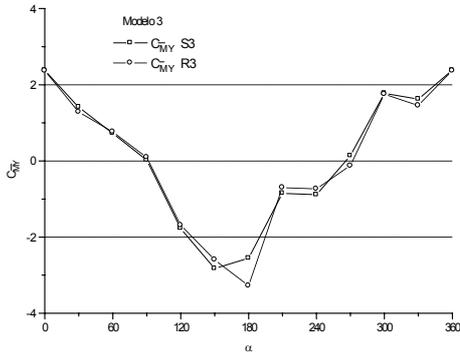
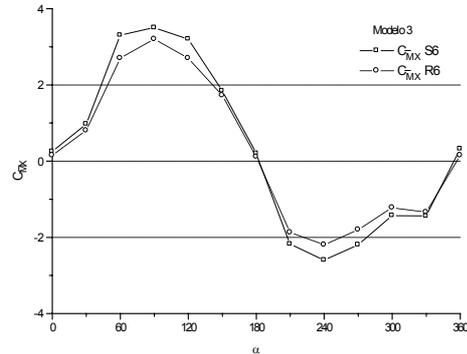
8.3 COMPARAÇÃO DE COEFICIENTES DE MOMENTO VARIANDO O ESCOAMENTO DE FUNDO E MANTENDO O ENTORNO.

Para analisar a influência da variação do escoamento de fundo quando permanece fixo o entorno superficial, mediram-se os momentos na base dos modelos respectivos. Apresentam-se a seguir, os coeficientes de momento médio e fatores de amplificação e de pico medido em S3 – R3 e S6 – R6.

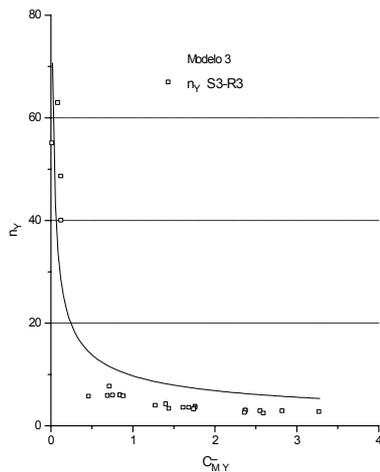
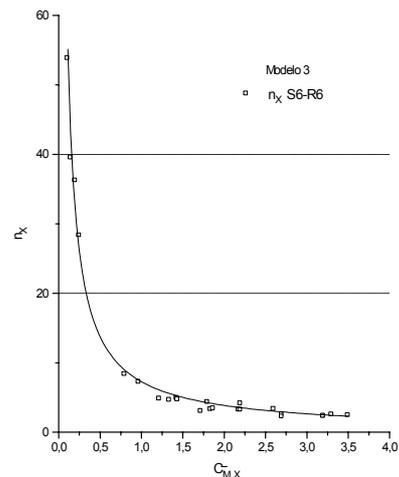
8.3.1 Modelo 3

Nas figuras 8.32 e 8.33, apresentam-se, com o fim de ilustrar, os coeficientes de momento médio longitudinal (Y) e transversal (X), em S3 – R3 e S6 – R6, para diferentes direções de vento de fundo.

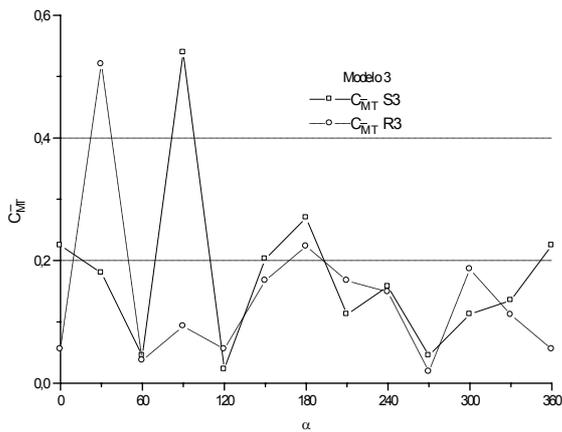
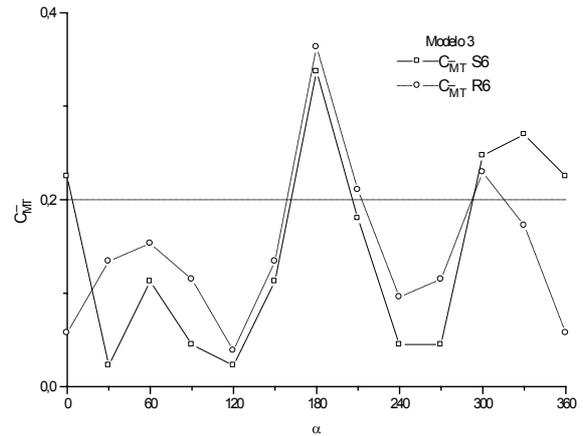
Nos dois pares de modelos físicos, os coeficientes de momento médio longitudinal e transversal mantêm variação idêntica ao modificar a direção do vento de fundo.

Fig. 8.32: C_{MY} versus α Fig. 8.33: C_{MX} versus α

Nas Figuras 8.34 e 8.35, observa-se a variação funcional dos fatores de amplificação de momento longitudinal e transversal η_i a respeito dos coeficientes de momento médio, nos modelos físicos S3 – R3 e S6 – R6.

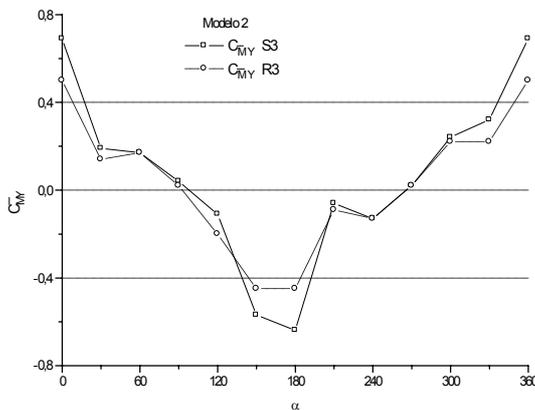
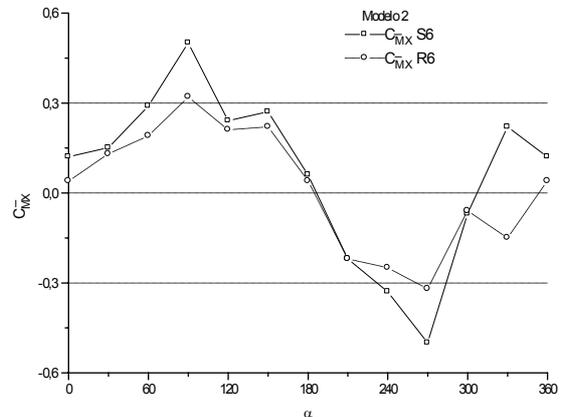
Fig. 8.34: η_Y versus C_{MY} Fig. 8.35: η_X versus C_{MX}

Nas Figuras 8.36 e 8.37 observa-se a variação de coeficiente de momento de torção médio ao variar a direção do vento incidente nos modelos S3 – R3 e S6 – R6. Geralmente, os momentos são semelhantes nos dois modelos físicos, com a exceção das direções de 30° e 90°, para os modelos físicos S3 – S6.

Fig. 8.36: C_{MT} versus α (S3-R3)Fig. 8.37: C_{MT} versus α (S6-R6)

8.3.2 Modelo 2

Nas Figuras 8.38 e 8.39 apresentam-se os coeficientes de momento médio longitudinal e transversal medidos com o modelo 2 nos modelos físicos S3 – R3 e S6 – R6, para diferentes direções de vento de fundo. Geralmente, os coeficientes de momento médio se distribuem de maneira semelhante nos dois modelos físicos analisados.

Fig. 8.38: C_{MY} versus α Fig. 8.39: C_{MX} versus α

Nas Figuras 8.40 e 8.41 mostra-se a distribuição dos fatores de amplificação de momento longitudinal e transversal η_i com os coeficientes de momento médio respectivos, nos modelos S3 – R3 e S6 – R6. Neste caso, a diferente altura do modelo 2 com respeito ao modelo 3 modifica o comportamento da função potencial, os fatores de amplificação de momento dispersam-se e não é possível definir seu comportamento. A altura do modelo o

situa na região onde as velocidades flutuantes do escoamento possuem caráter tridimensional com intensas flutuações e são altamente sensíveis às rugosidades superficiais.

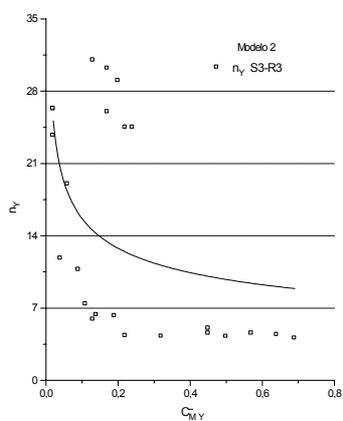


Fig. 8.40: η_Y versus C_{MY}

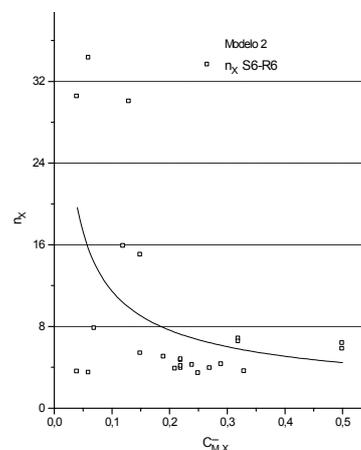


Fig. 8.41: η_X versus C_{MX}

Nas Figuras 8.42 e 8.43, apresentam-se os coeficientes de momento de torção médio ao variar a direção do vento incidente, em S3 – R3 e S6 – R6. Os coeficientes de momento de torção médio permanecem constantes para as direções analisadas, devido às baixas velocidades medidas na altura do modelo como consequência do efeito de proteção do entorno urbano, e à elevada rigidez do modelo à torção.

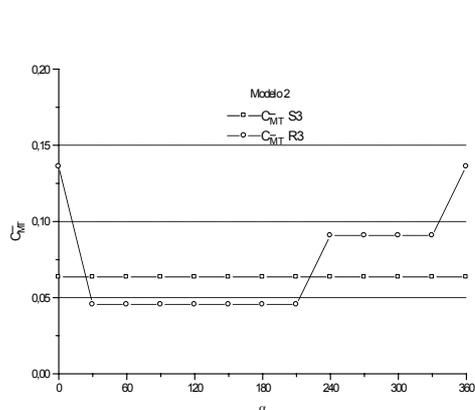


Fig. 8.42: C_{MT} versus α (S3-R3)

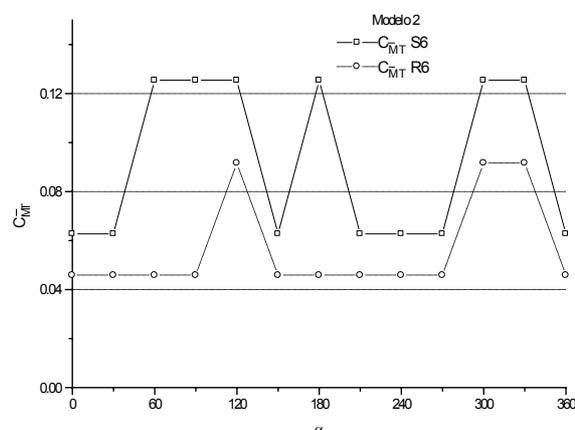


Fig. 8.43: C_{MT} versus α (S6-R6)

Nos pares de modelos físicos analisados, para igual direção do vento de fundo, os coeficientes não são iguais. No entanto, a tendência geral observada é de se manter em torno de um valor com dispersão reduzida.

8.4 RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS MODELOS FÍSICOS

$(S_i - R_j)$

8.4.1 Modelo 3

Nas Figuras 8.44 e 8.45 apresentam-se os fatores de amplificação de momento longitudinal e transversal (η_I), correspondentes ao modelo 3, obtidos nos modelos físicos analisados.

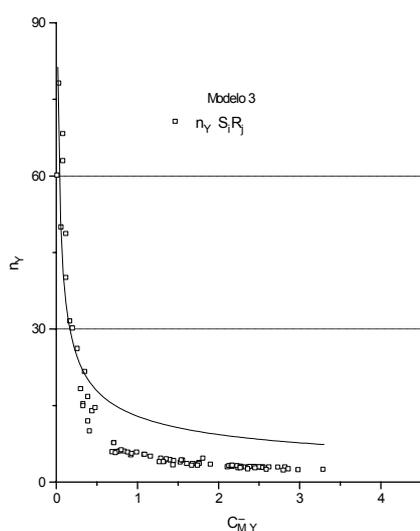


Fig. 8.44: η_Y versus C_{MY}

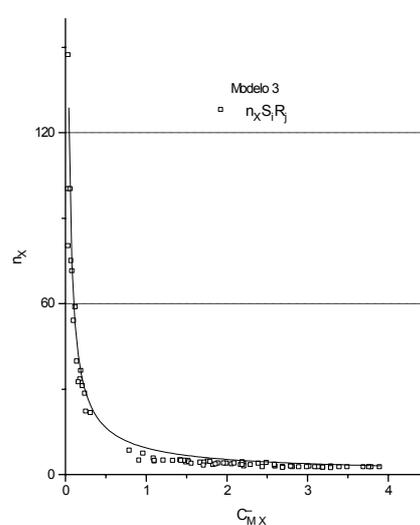


Fig. 8.45: η_X versus C_{MX}

Considerando que o fator de amplificação η_I se define como o quociente entre o momento máximo e o momento médio respectivo, para direções de vento onde o esforço médio longitudinal e transversal é mínimo (90° - 270° e 0° - 180°), o fator de amplificação tende a valores substancialmente maiores.

Os fatores de amplificação do momento longitudinal e transversal diminuem exponencialmente ao aumentar os coeficientes de momento médio, sendo que se os esforços médios são elevados, os fatores de amplificação de momento tendem assintoticamente ao valor 3,5. A expressão do fator de amplificação proposta neste trabalho é a seguinte:

$$n_I = P2C_{MI}^{P1} \quad (8.4)$$

Onde P1 e P2 são parâmetros de ajuste.

Esta informação permitiu reter os fatores de amplificação que representam situações físicas reais extremas e deixar de lado os valores que não representam estados de cargas significativos (esforços médios mínimos-coeficientes de rajadas máximos).

A tabela 8.2 mostra parâmetros da relação funcional ao ajustar a expressão matemática a valores medidos.

Tabela 8.2: Parâmetros de ajuste dos fatores de amplificação de momentos.

MODELO 3				
MODELOS FÍSICOS	Fator de amplificação do momento η_I			
	M_Y		M_X	
	P2	P1	P2	P1
S2-S3	10	-0,68	9,9	-0,75
S4-S5-S6	6,8	-1,02	7,11	-0,99
R3-R6	4,72	-1,06	5,86	-0,99
S3-R3	9,73	-0,50	6,21	-0,98
S6-R6	6,16	-0,85	7,28	-0,91
Médias das $S_{(I)} - R_{(J)}$	12,9	-0,47	9,38	-0,81

Nas Figuras 8.46, 8.47, 8.48 e 8.49 mostra-se o fator de pico do momento longitudinal e transversal F , com a intensidade de turbulência e as velocidades máximas. A dispersão do fator de pico do momento longitudinal e transversal diminui ao aumentar a intensidade de turbulência e as rajadas de vento, distribuindo-se em redor do valor 3,5.

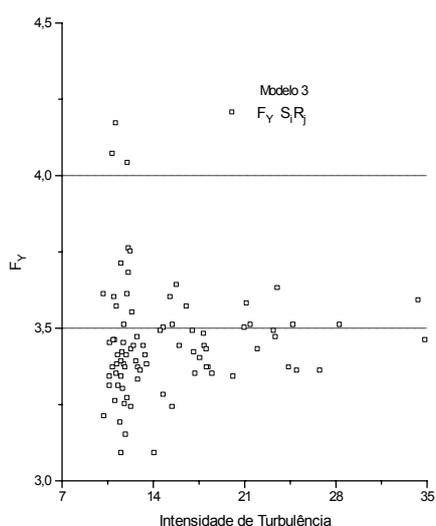


Fig. 8.46: F_Y versus IT

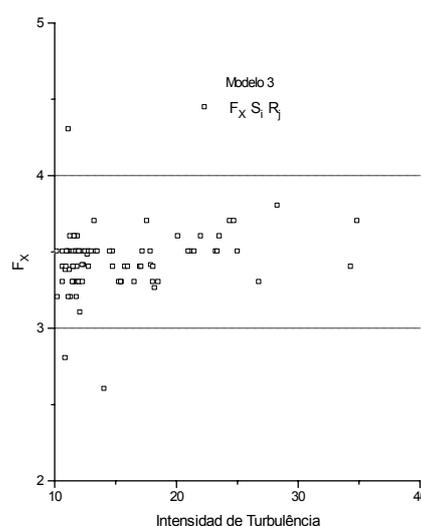
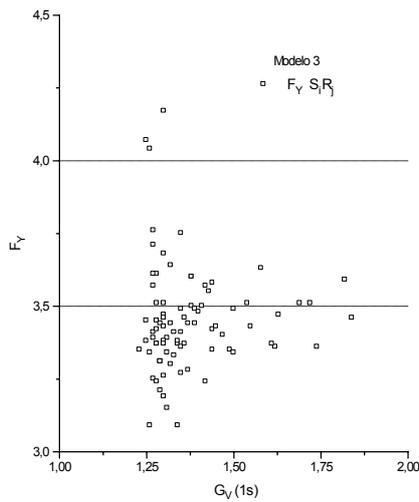
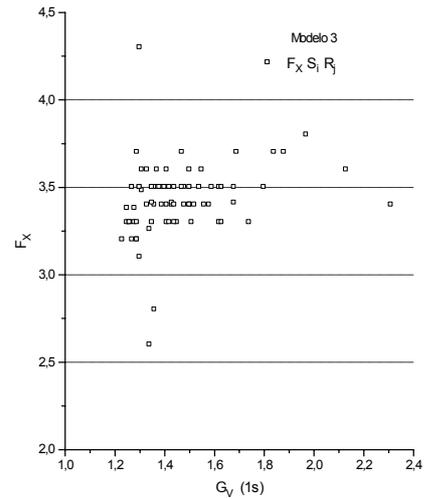
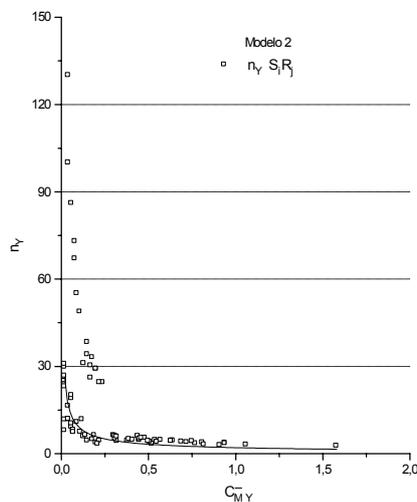
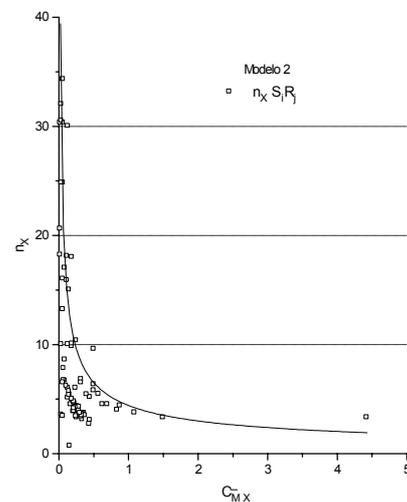


Fig. 8.47: F_X versus IT

Fig. 8.48: F_Y versus \hat{V} Fig. 8.49: F_X versus \hat{V}

8.4.2 Modelo 2

Nas Figuras 8.50 e 8.51 apresentam-se os fatores de amplificação de momento correspondente ao modelo 2, para os modelos físicos analisados.

Fig. 8.50: η_Y versus C_{MY} Fig. 8.51: η_X versus C_{MX}

Ainda é factível identificar nestas figuras uma região onde a função permanece aproximadamente constante um fator de amplificação η_i de 4. A maior dispersão do fator de amplificação com relação à expressão matemática proposta, deve-se ao fato que, pela altura, o modelo 2 fica imerso na região de escoamento turbulento tridimensional, no qual o efeito de proteção é máximo e as flutuações de velocidades e rajadas de vento introduzidas pelo entorno distribuem-se de maneira aleatória.

Na tabela 8.3 apresentam-se os parâmetros da expressão (8.4) ao analisar o modelo 2 com os modelos físicos construídos.

Tabela 8.3: Parâmetros de ajuste do fator de amplificação de momentos.

MODELO 2				
MODELOS FISICOS	Fator de amplificação do momento η_I			
	M_Y		M_X	
	P2	P1	P2	P1
S2-S3	4,05	-0,41	3,18	-0,52
S4-S5-S6	12,9	-0,35	2,09	-0,77
R3-R6	6,17	-0,32	1,60	-0,80
S3-R3	7,96	-0,29	3,23	-0,54
S6-R6	5,68	-0,34	2,96	-0,58
Médias das $S_{(I)} - R_{(J)}$	2,00	-0,65	4,41	-0,56

Nas Figuras 8.52, 8.53, 8.54 e 8.55 apresentam-se os fatores de pico de momento longitudinal e transversal em função da intensidade de turbulência e das rajadas de velocidades, respectivamente, observando-se que os fatores de pico distribuem-se em torno do valor 4.

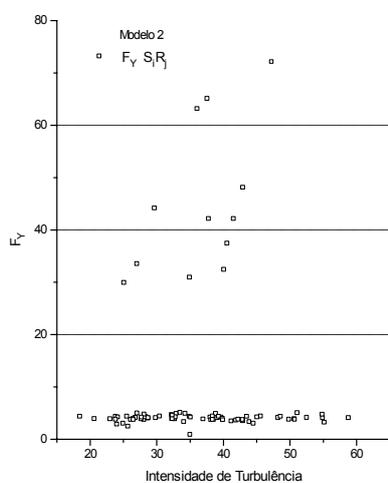


Fig. 8.52: F_Y versus IT

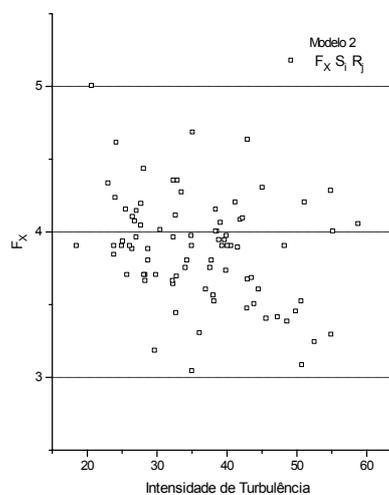
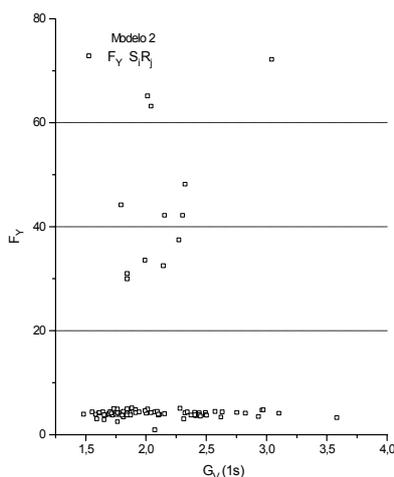
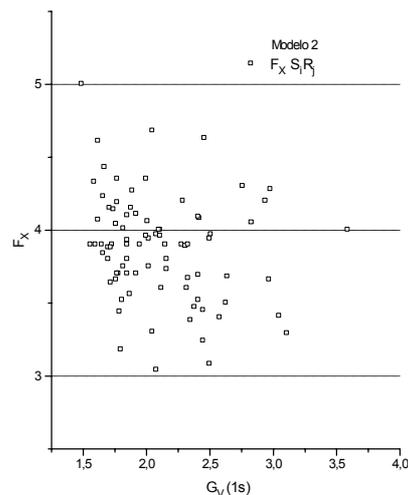


Fig. 8.53: F_X versus IT

Fig.8.54: F_Y versus \hat{V} Fig. 8.55: F_X versus \hat{V}

Os máximos momentos foram registrados para as mesmas direções do escoamento de fundo para as quais mediram-se os máximos momentos médios. Na tabela 8.4 mostram-se os momentos médios e seus correspondentes momentos máximos, para os modelos 3 e 2 obtidos com cada modelo físico ensaiado. Os momentos transversais médios e máximos para 90° e 270° são os maiores momentos medidos, devido às maiores dimensões da fachada exposta.

Tabela 8.4: Momentos médio longitudinal, transversal e de torção e momento máximo longitudinal e transversal medidos na base dos modelos (Nm)

Mod.	MODELO 3					MODELO 2				
	M_Y		M_X		M_T	M_Y		M_X		M_T
	\bar{M}_Y	\hat{M}_Y	\bar{M}_X	\hat{M}_X	\bar{M}_T	\bar{M}_Y	\hat{M}_Y	\bar{M}_X	\hat{M}_X	\bar{M}_T
S2	1,12	3,08	1,41	3,24	0,10	0,12	0,41	0,15	0,55	0,03
S3	1,26	3,06	1,68	4,23	0,24	0,11	0,45	0,19	0,63	0,01
S4	1,54	3,51	1,54	4,23	0,15	0,26	0,67	0,21	0,64	0,01
S5	1,13	3,06	1,83	4,52	0,17	0,12	0,50	0,24	0,79	0,01
S6	1,33	2,99	1,54	3,80	0,15	0,17	0,51	0,15	0,55	0,02
R3	1,40	3,26	1,87	4,44	0,28	0,10	0,51	0,18	0,63	0,03
R6	1,47	3,20	1,69	3,97	0,19	0,20	0,57	0,13	0,45	0,02
Sub.	1,61	2,88	2,17	4,94	0,10	0,30	0,82	0,45	1,06	0,03
Rural	1,49	3,51	2,28	4,80	0,10	0,37	0,84	0,57	1,18	0,01
Vazio	2,57	3,26	2,84	3,40	0,10	0,83	1,13	1,01	1,33	0,03

Na tabela 8.5 aprecia-se a direção do vento de fundo na qual se produzem os máximos momentos.

Tabela 8.5: Direção vento de fundo para os máximos momentos

Mod.	DIRECCIÓN VIENTO DE FUNDO (α°)					
	MODELO 3			MODELO 2		
Fis.	\hat{M}_Y	\hat{M}_X	\hat{M}_T	\hat{M}_Y	\hat{M}_X	\hat{M}_T
S2	180°	090°	090°	180°	240°	030°
S3	150°	270°	090°	000°	120°	000°
S4	150°	090°	150°	150°	240°	000°
S5	330°	270°	000°	000°	090°	090°
S6	150°	090°	000°	000°	060°	000°
R3	150°	270°	030°	180°	060°	000°
R6	180°	090°	180°	150°	240°	120°
SUB.	030°	090°	000°	000°	060°	000°
RUR.	000°	090°	000°	000°	090°	090°
VAZ.	000°	090°	060°	000°	090°	030°

Na tabela 8.6 indicam-se valores de fator de amplificação η_I e fator de pico F_I de momento máximo, para as posições nas quais se mediram os momentos máximos.

Tabela 8.6: Fator de amplificação e fator de pico de momento

Mod.	MODELO 3				MODELO 2			
	M_Y		M_X		M_Y		M_X	
	η_Y	F_Y	η_X	F_X	η_Y	F_Y	η_X	F_X
S2	2,8	3,4	2,7	3,5	3,4	3,6	3,7	4,0
S3	2,4	3,3	3,9	3,5	4,0	4,2	3,3	3,7
S4	2,3	3,3	2,7	3,5	2,6	4,0	3,0	3,9
S5	2,7	3,5	2,5	3,3	4,2	4,2	3,3	3,9
S6	2,3	3,8	2,5	3,3	3,0	3,7	3,7	4,0
R3	2,3	3,3	2,4	3,6	5,0	4,0	3,5	3,7
R6	2,2	3,6	2,3	3,4	2,8	3,7	3,5	4,0
Sub.	2,5	3,5	2,3	3,4	2,7	4,0	2,4	3,6
Rural	2,4	3,5	2,1	3,3	2,3	3,9	2,1	3,4
Vazio	1,3	3,3	1,2	3,5	1,4	3,0	1,3	3,2

Na tabela 8.7 observam-se os quocientes de momento médio e máximo, medidos em cada modelo físico analisado, com respeito ao momento médio e máximo do modelo isolado e escoamento de fundo suburbano $\left(\frac{\bar{M}_I}{\bar{M}_{Isub.}} e \frac{\hat{M}_I}{\hat{M}_{Isub.}} \right)$, representativo dos modelos considerados nas normas.

Tabela 8.7: Quocientes de momentos

Mod.	MODELO 3					MODELO 2				
	M_Y		M_X		M_T	M_Y		M_X		M_T
	$\frac{\overline{M}_Y}{\overline{M}_{YSub.}}$	$\frac{\hat{M}_Y}{\hat{M}_{YSub.}}$	$\frac{\overline{M}_X}{\overline{M}_{XSub.}}$	$\frac{\hat{M}_X}{\hat{M}_{XSub.}}$	$\frac{\overline{M}_T}{\overline{M}_{TSub.}}$	$\frac{\overline{M}_Y}{\overline{M}_{YSub.}}$	$\frac{\hat{M}_Y}{\hat{M}_{YSub.}}$	$\frac{\overline{M}_X}{\overline{M}_{XSub.}}$	$\frac{\hat{M}_X}{\hat{M}_{XSub.}}$	$\frac{\overline{M}_T}{\overline{M}_{TSub.}}$
S2	0,69	1,07	0,48	0,78	1,00	0,40	0,50	0,33	0,52	1,00
S3	0,78	1,10	0,52	0,90	2,40	0,37	0,55	0,42	0,59	0,33
S4	0,96	1,22	0,71	0,86	1,50	1,87	0,82	0,47	0,60	0,33
S5	0,70	1,06	0,84	0,91	1,70	0,40	0,61	0,51	0,74	0,33
S6	0,83	1,04	0,71	0,77	1,50	0,57	0,62	0,33	0,52	0,67
R3	0,87	1,13	0,86	0,90	2,80	0,33	0,62	0,40	0,59	1,00
R6	0,79	1,22	0,78	0,80	1,90	0,67	0,70	0,29	0,42	0,67
Sub.	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Rural	0,93	1,22	1,05	0,97	1,00	1,23	1,02	1,27	1,11	0,33
Vazio	1,60	1,13	1,31	0,69	1,00	2,77	1,37	2,24	1,25	1,00

Os momentos longitudinais e transversais médios do modelo isolado exposto a escoamento de fundo suburbano, ultrapassam aqueles momentos medidos com entorno superficial imediato, sendo excedidos somente no caso de escoamento uniforme e suave.

Como o modelo isolado não tem entorno superficial próximo, o escoamento médio atinge o modelo, com uma única direção em toda a altura da edificação. A energia do escoamento médio e os redemoinhos de grande tamanho, que envolvem toda a estrutura, maximizam a ação do vento. Ao acrescentar os entornos superficiais, aumentam as rajadas e a intensidade de turbulência do escoamento na direção do vento incidente. As frequências de flutuações de velocidades contidas na turbulência atmosférica, deslocam-se para valores superiores, diminuindo o efeito isolado. Desta maneira, os momentos longitudinais flutuantes máximos, medidos com modelo isolado, são ultrapassados na maioria dos modelos físicos.

Ao acrescentar o entorno superficial, a interação do escoamento de fundo com o entorno, introduz no vento incidente redemoinhos de tamanhos diferentes, destruindo os máximos redemoinhos de fundo, aumentando a intensidade da turbulência e diminuindo a energia do escoamento médio. Isto faz que as escalas temporais e espaciais integrais da turbulência diminuam, aumentando a intensidade da turbulência do vento incidente e diminuindo a energia do escoamento médio, na região a sotavento do modelo, debilitando a atividade da turbulência na esteira do modelo, com desprendimento alternados de vórtices de menor dimensão e intensidade do que quando o modelo está isolado, provocando para a direção de 90° e 270°, momentos máximos transversais menores (X). Assim sendo, devido à elevada seção transversal exposta, ao aumentar a turbulência no escoamento de vento incidente, a ação

não foi uniforme, mantendo, para o modelo isolado, os máximos momentos flutuantes (Tabela 8.4).

Ao comparar os momentos longitudinais medidos no modelo 2 observa-se, na Tabela 8.4, que os momentos longitudinais médio e máximo, medidos no modelo isolado 2, são, geralmente, sensivelmente maiores que aqueles medidos nos modelos físicos restantes. No modelo 3 os momentos máximos medidos nos modelos físicos analisados são ultrapassados ao situar o modelo em ambiente urbano. Isto corrobora que, unicamente sobre modelos altos é de interesse verificar se as cargas provocadas pelo vento se amplificam ao considerar as perturbações provocadas ao acrescentar o entorno superficial urbano a respeito das medidas sobre o modelo considerado isolado.

Quando o modelo tem uma altura até duas vezes superior à média, o momento medido sobre o modelo isolado tem conta da condição de carga de projeto mais desfavorável, provocando o entorno um efeito de proteção que diminui as cargas médias e flutuantes.

Os momentos de torção médios no modelo 3 isolado, são ultrapassados em 200% ao situar os entornos superficiais, situando este esforço como um dos mais amplificados respeito do isolado. Assim sendo, corrobora-se o dito pelos projetistas de estruturas altas em centros urbanos, quando expressam que o momento torção, nestas estruturas, é sensível à situação e dimensão dos obstáculos superficiais próximos à estrutura principal.

Os momentos na base, determinados por meio da aplicação do procedimento de normas de vento argentina e brasileira, estrutura exposta a vento categoria suburbano, reproduzindo a forma fundamental de vibração, transformados em escala de modelo, considerando as leis de semelhança, são superiores aos momentos médios medidos no modelo isolado em túnel de vento exposto a um escoamento de camada limite turbulenta suburbana.

A norma brasileira NBR 6123 (NB 599) 1987, considera o efeito de excentricidade da força de arraste, provocada pelo vento perpendicular e oblíquo à superfície do modelo. Em estruturas expostas a efeitos de vizinhança com edifícios próximos à estrutura principal, deve-se considerar uma excentricidade da força com respeito ao eixo vertical geométrico de:

$$e = 0,15a$$

sendo a a face perpendicular à direção do escoamento médio. O momento de torção resultante, considerando que é a mesma superfície da estrutura exposta, para calcular o momento na base, utilizando a norma, resulta:

$$MT_{M3} = F_{M3}e_{M3} = 6,3N0,01m = 0,06Nm$$

O momento torção médio medido no modelo isolado ultrapassa este valor. Ao situar o modelo em ambiente urbano, os momentos torções medidos aumentam.

Para o modelo 2, o momento torção calculado pelo procedimento do regulamento resulta:

$$MT_{M2} = F_{M2}e_{M2} = 2,60N0,01m = 0,03Nm$$

Nas tabelas 8.8 e 8.9 apresentam-se os quocientes de momentos médios e máximos determinados com os modelos 3 e 2 ao colocar nos modelos físicos urbanos respeitos aos calculados com os códigos de vento Argentino e NBR 6123. Ao substituir o ambiente suburbano pelo urbano, as normas reduzem o valor do momento médio, isto se observa também nos ensaios no túnel ao situar o modelo em ambiente urbano, mantendo-se a superioridade do primeiro a respeito dos valores médios do segundo. Geralmente, os regulamentos consideram que ao aumentar a rugosidade superficial prevalece o efeito de proteção. Os códigos incluem o efeito de rajadas de vento e amplificação da resposta pela vibração da estrutura no primeiro modo, no entanto, os momentos máximos obtidos nos ensaios no túnel de vento no modelo são superiores aos valores indicados pelos regulamentos nomeados.

Uma situação semelhante se verificou ao analisar os resultados medidos no modelo 2 com momentos calculados com os procedimentos dos códigos nomeados. O momento de torção calculado para o edifício mais alto, com o procedimento das normas, resulta inferior ao valor médio medido no modelo, verificando que a torção é sensível às modificações introduzidas pelo entorno superficial à estrutura turbulenta do escoamento de fundo.

Tabela 8.8: Quociente de momentos no modelo 3 e 2 respeito aos códigos de vento Argentino

Mod.	MODELO 3					MODELO 2				
	M_Y		M_X		M_T	M_Y		M_X		M_T
	$\frac{\bar{M}_Y}{\bar{M}_{Arg.}}$	$\frac{\hat{M}_Y}{\hat{M}_{Arg.}}$	$\frac{\bar{M}_X}{\bar{M}_{Arg.}}$	$\frac{\hat{M}_X}{\hat{M}_{Arg.}}$	$\frac{\bar{M}_T}{\bar{M}_{TBr.}}$	$\frac{\bar{M}_Y}{\bar{M}_{Arg.}}$	$\frac{\hat{M}_Y}{\hat{M}_{Arg.}}$	$\frac{\bar{M}_X}{\bar{M}_{Arg.}}$	$\frac{\hat{M}_X}{\hat{M}_{Arg.}}$	$\frac{\bar{M}_T}{\bar{M}_{TBr.}}$
S2	0,74	1,73	0,93	1,82	1,67	0,39	1,14	0,48	1,53	1,00
S3	0,83	1,72	1,10	2,38	4,00	0,35	1,25	0,61	1,75	0,33
S4	1,01	1,97	1,01	2,38	2,50	0,84	1,86	0,68	1,78	0,33
S5	0,74	1,72	1,20	2,54	2,83	0,39	1,39	0,77	2,19	0,33
S6	0,88	1,67	1,01	2,13	2,50	0,55	1,42	0,48	1,53	0,67
R3	0,92	1,83	1,23	2,49	4,67	0,32	1,42	0,58	1,75	1,00
R6	0,97	1,80	1,11	2,23	3,17	0,64	1,58	0,42	1,25	0,67
Sub.	1,06	1,98	1,43	2,77	1,67	0,97	2,28	1,45	2,94	1,00
Rural	0,98	1,62	1,50	2,70	1,67	1,19	2,33	1,84	3,28	0,33
Vazio	1,69	1,83	2,14	1,91	1,67	2,67	3,14	3,25	3,69	1,00

Tabela 8.9: Quociente de momentos no modelo 3 e 2 respeito aos códigos de vento NBR 6123

Mod.	MODELO 3					MODELO 2				
	M_Y		M_X		M_T	M_Y		M_X		M_T
	$\frac{\bar{M}_Y}{\bar{M}_{Br.}}$	$\frac{\hat{M}_Y}{\hat{M}_{Br.}}$	$\frac{\bar{M}_X}{\bar{M}_{Br.}}$	$\frac{\hat{M}_X}{\hat{M}_{Br.}}$	$\frac{\bar{M}_T}{\bar{M}_{TBr.}}$	$\frac{\bar{M}_Y}{\bar{M}_{Br.}}$	$\frac{\hat{M}_Y}{\hat{M}_{Br.}}$	$\frac{\bar{M}_X}{\bar{M}_{Br.}}$	$\frac{\hat{M}_X}{\hat{M}_{Br.}}$	$\frac{\bar{M}_T}{\bar{M}_{TBr.}}$
S2	0,80	1,75	1,01	1,84	1,67	0,41	1,32	0,52	1,77	1,00
S3	0,91	1,74	1,21	2,40	4,00	0,38	1,45	0,65	2,03	0,33
S4	1,11	1,99	1,11	2,40	2,50	0,89	2,16	0,72	2,06	0,33
S5	0,81	1,74	1,32	2,57	2,83	0,41	1,61	0,83	2,55	0,33
S6	0,96	1,70	1,11	2,16	2,50	0,59	1,65	0,52	1,77	0,67
R3	1,00	1,85	1,34	2,52	4,67	0,34	1,65	0,62	2,03	1,00
R6	1,06	1,82	1,22	2,25	3,17	0,69	1,84	0,45	1,45	0,67
Sub.	1,16	1,64	1,56	2,81	1,67	1,03	2,64	1,55	3,42	1,00
Rural	1,07	2,00	1,64	2,73	1,67	1,28	2,70	1,97	3,81	0,33
Vazio	1,85	1,85	2,04	1,93	1,67	2,86	3,65	3,48	4,29	1,00

Em edifícios cuja altura é até duas vezes a altura média dos obstáculos superficiais em ambientes urbano denso, as variações dos momentos de torção médios são as tidas em conta pelas normas de cálculos vigentes.

Os momentos médios na base de estruturas calculados pela norma levam em conta, adequadamente, os momentos médios na base dos ensaios em túnel de vento, em modelos em ambiente urbano, no entanto, ao comparar os momentos máximos, resultam sensivelmente inferiores.

O esforço mais sensível ao construir o ambiente urbano, tendo em conta a aleatoriedade das dimensões e a disposição dos modelos que formam o entorno superficial imediato, é o

momento torção, Os resultados obtidos foram maiores aos obtidos com as normas, mas são compatíveis com a bibliografia de referência, medindo-se em algumas posições, valores superiores aos apresentados.

No modelo 2, todos os modelos físicos analisados produzem o efeito de proteção, apesar de ter duas vezes a altura média dos obstáculos superficiais. Explica-se porque até essa altura, as medições de velocidades do vento confirmaram a sub-camada rugosa na estrutura da camada limite turbulenta.

9. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o procedimento para reproduzir, em túnel de vento, um escoamento com características de vento urbano atmosférico; ele complementa a técnica tradicional de simulações de escoamentos totalmente desenvolvidos com a construção de modelos físicos.

Na construção e disposição dos modelos que compõem os modelos físicos, considerou-se a natureza aleatória das dimensões, situação e deslocamento das estruturas mediante a técnica Monte Carlo e o modelo de Nataf. O método reproduz o entorno superficial em ambientes centrais de grandes cidades, considerando a natureza aleatória das dimensões e a separação das construções. Ele permitiu simular campos ou processos aleatórios, neste caso o entorno h do prédio, definido como um campo aleatório bi-dimensional, em termos da sua densidade de probabilidade e da sua densidade espectral.

Analisou-se a estrutura da camada limite urbana na região inferior, através das medições em diferentes alturas das velocidades médias e flutuantes, intensidade de turbulência, macroescala integral e escala temporal da turbulência e espectros da componente de velocidade flutuante longitudinal. Verificou-se a presença e a altura da subcamada rugosa, em camada limite sobre superfície rugosa, sem haver realizado medições de Tensões de Reynolds, por meio de medições e comparações em diferentes alturas de velocidades médias e parâmetros estatísticos da componente flutuante longitudinal do escoamento médio. Verificou-se que o campo de velocidade em centro urbano é nitidamente tridimensional e que a direção do vento de fundo influi no campo. Ademais, sugeriu-se um espectro de potência para análise dinâmica de edifícios altos expostos à ação do vento em ambientes urbanos, assim como recomendações referidas à variação de velocidade e intensidade de turbulência da componente longitudinal da turbulência.

Para analisar a confiabilidade das cargas de vento sugeridas nos códigos de vento estudaram-se as cargas sobre três modelos de diferentes alturas, medidas em condição de modelo isolado e situado em seis situações de entornos rugosos diferentes.

As cargas a medir foram momentos flexão na base longitudinal e transversal ao escoamento médio e momento de torção. Com os resultados obtidos, pôde-se avaliar as diferenças com respeito às cargas sugeridas pelo código e as variações provocadas ao modificar a rugosidades superficiais.

Os momentos médios na base de estruturas calculados pelas normas levam em conta, adequadamente, os momentos médios na base medidos nos ensaios em túnel de vento, em modelos em ambiente urbano, no entanto, ao comparar esses momentos com os momentos flutuantes médios, resultam sensivelmente inferiores.

O esforço mais sensível ao construir o ambiente urbano, tendo em conta a aleatoriedade das dimensões e a disposição dos modelos que formam o entorno superficial imediato, é o momento de torção. Os resultados obtidos são compatíveis com a bibliografia de referência, medindo-se, em algumas posições, valores superiores aos apresentados.

Os valores determinados ao aplicar os códigos de vento consideram adequadamente os esforços médios, mas ao incorporar os efeitos flutuantes as cargas determinadas são por defeito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKINS, R. E., (1992). Effects of turbulence on mean force and moment coefficients. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 41-44, p. 701-712, 1992.

BALENDRA, T., (1993). *Vibration of Buildings to Wind and Earthquake Loads*. **Spinger-Verlag London Limited 1993**.

BAO-SHI SHIAUA; YUAN-BIN CHENA, (2002). Observation on wind turbulence characteristics and velocity spectra near the ground at the coastal region. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, Vol. 90, p. 1671–1681, 2002.

BAILEY, P. A., (1985). Interference excitation of twin tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 21, p. 323-338, 1985.

BLESSMANN, J., (1998). *Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento*. **Editora da Universidade, UFRGS**; Porto Alegre, 1998.

BLESSMANN, J., (1995). *O vento na engenharia estrutural*. Porto Alegre: **Editora Universidade /UFRGS**, 1995.

BLESSMANN, J., (1992). Neighboring wind effects on two tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 41-44, p. 1041-1052, 1992.

BLESSMANN, J., (1990). *Aerodinâmica das Construções*. **SAGRA**, Porto Alegre, Brasil.

BLESSMANN, J., (1986). *O vento na engenharia estrutural - 1ª Parte*. Porto Alegre: **Escola de Engenharia, CPGEC /UFRGS**, 1986.

BLESSMANN, J., (1986 b). *O vento na engenharia estrutural - 2ª Parte*. Porto Alegre: **Escola de Engenharia, CPGEC /UFRGS**, 1986.

BLESSMANN, J., (1985 a). Esforços de torção em edifícios altos. **XIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural**, Buenos Aires, Argentina. Memórias “B”, Tomo II, pág. 463- 473.

BLESSMANN, J., (1985 b). Buffeting effects on neighboring tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 18, p. 105-110, 1985.

BLESSMANN, J., RIERA, J. D., (1985). Wind excitation of neighboring tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 18, p. 91-103, 1985.

BLESSMANN, J., (1983). Efeitos do vento em edificios alteados vizinhos. **XII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural**, Santiago, Chile, Vol. trabajo A-8, pág. 1-15.

BLESSMANN, J., RIERA, J. D., (1979). Interaction effects in neighboring tall buildings. **Proceedings of the Fifth International Conference**, Fort Collins, Colorado, USA, Vol. 1, p. 519-528, 1979.

BLESSMANN, J., (1966). Um estudo qualitativo do fenômeno de interferência. **XI Jornadas Sul-americanas de Engenharia Estructural**, São Paulo, Brasil, pág. 585-600, 1966.

CASTRO, I. P., (1979). The relaxation and steadiness of wakes behind obstacles in boundary layers. **Proceedings of the Fifth International Conference on Wind Engineering**, Fort Collins, Colorado, USA, Vol. 1, p. 299-307, 1979.

CHENG-HSIN CHANGA; MERONEY, ROBERT N., (2003). The effect of surroundings with different separation distances on surface pressures on low-rise buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 91, p. 1039-1050, 2003.

COOK, N. J. , MAYNE, J R., (1979). A novel working approach to the assessment of wind loads for equivalent static design. **Journal of Industrial Aerodynamics**, Vol. 4, p. 149-164, 1979.

COOK, N. J., (1985). The designer's guide to wind loading of building structures , Part 1: Background, damage survey, wind data and structural classification. Building Research Establishment report, London, 1985.

COOK, N. J., (1978). Wind-Tunnel Simulation of the Adiabatic Atmospheric Boundary Layer by Roughness, Barrier and Mixing-Device Methods. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 3, p. 157-176, 1978.

COOK, N. J., (1977). Determination of the model scale factor in wind-tunnel simulations of the adiabatic atmospheric boundary layer. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 2, p. 311-321, 1977.

DE BORTOLI, M.E.; NATALINI, B.; PALUCH, M.J. AND NATALINI, M.B., (2002). Part-depth wind tunnel simulations of the atmospheric boundary layer. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 90, p. 281-291, 2002.

DE BORTOLI, M.E (2005). Relatório Técnico 1: Modelos 1-2-3 Simulados Numericamente. Laboratorio de Aerodinámica, Facultad de Ingeniería, UNNE, p. 1-81, 2005.

DE BORTOLI, M.E (2005). Relatório Técnico 2: Correlações cruzadas dos momentos longitudinal, transversais e torção no modelo 3. Laboratorio de Aerodinámica, Facultad de Ingeniería, UNNE, p. 1-9, 2005.

GOWDA, B. H. L., (1980). Mean-flow and turbulence measurements in the near wake a rectangular cylinder under stationary and galloping conditions. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 6, p. 261-272, 1980.

GOWDA, B. H. L., TULAPURKARA, E. G., KANNA BABU, A., (1997). Interference effects on the mean velocities and turbulence intensities behind a tall body due to a short body in tandem, Part I: Mean velocities. **Indian Institute of Technology, Madras**, Chennai 600 036, INDIA.

GOWDA, B. H. L., TULAPURKARA, E. G., KANNA BABU, A., (1997). Interference effects on the mean velocities and turbulence intensities behind a tall body due to a short body in tandem, Part II: Turbulence intensities. **Indian Institute of Technology, Madras**, Chennai 600 036, INDIA.

HARRIS, R. I., (1982). An improved method for the prediction of extreme values of wind effects on simple buildings and structures. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 9, p. 343-379, 1982.

HINZE, J. O., (1959). **Turbulence, An Introduction to Its Mechanism and Theory**. McGraw-Hill Bok Company, 1959.

HO, T. C. E., SURRY, D., DAVENPORT, A. G., (1990). The variability of low building wind loads due to surrounding obstructions. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 36, p. 161-170, 1990.

HO, T. C. E., SURRY, D., DAVENPORT, A. G., (1991). Variability of low building wind loads due to surroundings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 38, p. 297-310, 1991.

HO, T. C. E., (1992). Variability of low building wind loads. **Department of Civil Engineering Faculty of Engineering Science**, Faculty of Graduate Studies The University of Western Ontario, London, Canada, July 1992.

ISYUMOV, N., POOLE, M., (1983). Wind induced torque on square and rectangular building shapes. **Sixth International Conference on Wind Engineering**, Gold Coast, Australia, 21-25 March, 1983, Vol. 1, Sessions 1 to 8, 1983.

KAREEM, A., (1987). The effect of aerodynamic interference on the dynamic response of prismatic structures. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 25, p. 365-372, 1987.

KATO, N.; OHKUMA, T., KIM, J. R., MARUKAWA, H., NIIHORI, Y., (1992). Full scale measurements of wind velocity in two urban areas using an ultrasonic anemometer. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 41-44 p. 67-78, 1992.

KAWAMURA, S., KIMOTO, E., FUKUSHIMA, T., TANIKE, Y. (1988). Environmental wind characteristics around the base of a tall building – a comparison between model test and full scale experiment. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 28, p. 149-158, 1988.

KIEFER, H., PLATE, E. J., (1998). Modelling of mean fluctuating wind loads in built-up areas. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 74-76, p. 619-629, 1998.

LUO, S. C., LI, L. L., SHAH, D., (1999). A, Aerodynamic stability of the downstream of two tandem square-section cylinders. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 79, p. 79-103, 1999.

MARUYAMA, T., ISHIZAKI, H., (1998). A wind tunnel test on the boundary layer characteristics above an urban area. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 28 p.139-148, 1998.

MAEDA, J., MAKINO, M., (1988). Power spectra of longitudinal and lateral wind speed near the ground in strong winds. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 28 p. 31-40, 1988.

MAHMOOD YAHYAI, KRISHEN KUMAR, PREM KRISHNA AND P. K. PANDE, (1992). Aerodynamic interference in tall rectangular buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 41-44, p. 859-866, 1992.

PEI-LING LIU; ARMEN DER KIUREGHIAN, (1986). Multivariate distribution models with prescribed marginal and covariance. **Probabilistic Engineering Mechanics**, Vol. 1, N° 2, p. 105-112, 1986.

PETERKA, J. A., CERMAK, J. E., (1975). Turbulence in building wakes. **Proceedings of the Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures**, Heatrow, p. 447-463, 1975.

PETERKA, J. A., MERONEY, R. N., KOTHARI, K. M., (1985), Wind flow patterns about buildings, **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol, 21, p, 21-38, 1985,

PLATE, ERICH J., (2000). Wind loads and diffusion in urban areas. **4th Bluff Body Aerodynamics and Applications Colloquium- BBAA IV**, Ruhr-University Bochum, p. 3-7, September, 2000.

PLATE, ERICH J., (1999). Methods of investigating urban wind fields physical models. **Atmospheric Environment**, Vol. 33, p. 3981-3989, 1999.

ROTACH, MATHIAS W., (1999). On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion. **Atmospheric Environment**, Vol. 33, p. 4001-4008, 1999.

RUSCHEWEYH, H. P., (1998). Aerodynamic interference effects between buildings and structures. **Wind Effects on Buildings and Structures, Riera & Davenport (Eds)**, 1998 Balkema, Rotterdam, p. 227-243, 1998.

RUSCHEWEYH, H. P., (1979). Dynamic response of high rise buildings under wind action with interference effects from surrounding buildings of similar size. **Proceedings of the Fifth International Conference on Wind Engineering, Fort Collins, Colorado, USA**, July, Vol. 2, p.725-734, 1979.

SAATHOFF, P., MELBOURNE, W. H., (1999). Effects of freestream turbulence on streamwise pressure measured on a square-section cylinder. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 79, p. 61-78, 1999.

SAKAMOTO, H., HANIU, H., (1998). Aerodynamic forces acting on two square prisms placed vertically in a turbulent boundary layer. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 31, p. 41-66, 1998.

SAUNDERS, J. W., MELBOURNE, W. H., (1979). Buffeting effects of upstream buildings. **Proceeding of the Fifth International Conference**, Fort Collins, Colorado, USA, Vol. 1, p. 593-606, 1979.

SURRY, D., DJAKOVICH, D., (1995). Fluctuating pressures on models of tall buildings. **Journal Wind Engineering, And Industrial Aerodynamics**, Vol. 58, p. 81-112, 1995.

SURRY, D., (1982). Consequences of distortions in the flow including mismatching scales and intensities of turbulence. **Proceedings of the International Workshop on Wind Tunnel Modelling Criteria and Techniques in Civil Engineering Applications**, Gaithersburg, Maryland, USA, p. 137-185, 1982.

SYKES, D. M., (1983). Interference effects on the response of a tall building model. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 11, p. 365-380, 1983.

THEURER, W., BAEHLIN, W., PLATE, E. J., (1992). Model Study of the Development of Boundary Layers Above Urban Areas. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 41-44, p. 437-448, 1992.

THORODDSEN, S. T., PETERKA, J. A., CERMAK, J. E., (1998). Correlation of the components of wind-loading on tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 28, p. 351-360, 1988.

WITTEW, A. R., MÖLLER, S. V., (2000). "Characteristics of the Low-Speed Wind Tunnel of the UNNE". **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 84 p. 307-320, 2000.

WONG, P. T. Y., KO, N. W. M., CHIU, A. Y. W., (1995). Flow characteristics around two parallel adjacent square cylinders of different sizes. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 54/55, p. 263-275, 1995.

YIM, JOHN Z., CHUN-REN CHOU, (2001). A study of the characteristic structures of strong wind. **Atmospheric Research**, Vol. 57, p. 151-170, 2001.

YIM, JOHN Z., CHUN-REN CHOU, WEI-PO HUANG, (2000). A study on the distributions of the measured fluctuating wind velocity components. **Atmospheric Environment**, Vol. 34, p. 1583-1590, 2000.

ZHANG, W. J., KWOK, K. C. S., XU, Y. L., (1994). Aerolastic torsional behavior of tall buildings in wakes. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Vol. 51, p. 229-248, 1994.